



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ENERGETICKÝ ÚSTAV**

ENERGY INSTITUTE

**NÁVRH ZKUŠEBNÍHO ZAŘÍZENÍ PRO TESTOVÁNÍ  
VZDUCHEM CHLAZENÝCH PARNÍCH KONDENZÁTORŮ**

DESIGN OF TEST EQUIPMENT FOR TESTING AIR-COOLED STEAM CONDENSERS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Filip Líška

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

Ing. Petr Kracík, Ph.D.

**BRNO 2019**



# Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav  
Student: **Filip Líška**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Energetika, procesy a životní prostředí  
Vedoucí práce: **Ing. Petr Kracík, Ph.D.**  
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## **Návrh zkušebního zařízení pro testování vzduchem chlazených parních kondenzátorů**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Problematika vzduchem chlazených parních kondenzátorů pro odvedení zbytkového tepla z energetického bloku je v dnešní době vážnější v důsledku nedostatku povrchové vody v letním období v některých částech Evropy. Optimální návrh parního kondenzátoru vede ke snížení tlaku ve výstupním hrdle parní turbíny a tím i ke zvýšení vyrobené elektřiny a účinnosti celého bloku. Základní náplní práce bude navržení zkušebního zařízení pro testování vzduchem chlazených trubek, ve kterých bude kondenzovat vodní pára.

### **Cíle bakalářské práce:**

- popis vzduchem chlazených kondenzátorů
- popis základních koncepcí uspořádání trubek v trubkovém svazku kondenzátoru
- návrh zkušebního zařízení pro testování různých uspořádání vzduchem chlazených trubek
- ověření návrhu pomocí CFD simulace

### **Seznam doporučené literatury:**

BALÁŠ, Marek. Kotle a výměníky tepla. Vydání druhé. Brno: Akademické nakladatelství CERM®, s.r.o. Brno, 2013, 119 s. ISBN 978-80-214-4770-7.

STEHLÍK, Petr, Josef KOHOUTEK a Jan NĚMČANSKÝ. Tepelné pochody: výpočet výměníku tepla. Brno: VUT Brno, 1991, 129 s. ISBN 80-214-0363-2.

VDI Heat Atlas. 2 vydání. New York: Springer, 2010, 1551 s. ISBN 978-3-540-77876-9.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Práca je zameraná na návrh skúšobného zariadenia pre testovanie vzduchom chladených kondenzátorových trubiek. Na úvod sú popísané základné typy priemyslovo využívaných vzduchových kondenzátorov, možnosti typov trubiek a ich materiály. K návrhovému zariadeniu je už zakúpený radiálny ventilátor ktorý bude do veterného tunelu dodávať chladiaci vzduch. Pre minimálne a maximálne parametre je najprv navrhnutá základná geometria a stavové parametre. Následne bol základný návrh testovaný v CFD. Pretože výsledok prvého modelu nebol vyhovujúci resp. rýchlostné pole nebolo rovnomerné bola zmenená koncepcia na priamy tunel. Pre dané podmienky bolo u druhého modelu otestovaných niekoľko variant a pre najlepšiu z nich bolo otestované aj „ofúknutie“ trubiek vo vnútri veterného tunela.

### **Kľúčové slova**

Vzduchom chladené kondenzátory, skúšobné zariadenie, prúdenie difúzorom, trubkové usporiadanie, CFD simulácia

## **ABSTRACT**

The work is focused on the design of a testing device for testing air-cooled condenser tubes. At the beginning of work are described basic types of industrial air condensers, possibilities of tube types and their materials. A radial fan that will supply cooling air to the wind tunnel is already purchased for the testing device. For minimum and maximum parameters, the basic geometry and state parameters are first proposed. Subsequently, the basic design was tested in the CFD. The result of the first model was not satisfying because the speed field has not been evenly changed to a straight tunnel. For these conditions, several variants have been tested in the second model, and the "blow" on the tubes inside the wind tunnel has been tested for the best variant.

### **Key words**

Air cooled condensers, testing device, flow in a diffuser, tube array, CFD simulation

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA**

LÍŠKA, Filip. Návrh zkušebního zařízení pro testování vzduchem chlazených parních kondenzátorů. Brno, 2019. 50 s Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116529>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Petr Kracík.

## **PREHLÁSENIE**

Prehlasujem, že som bakalarsku prácu na téma **Návrh skúšobného zariadenia pre testovanie vzduchom chladených parných kondenzátorov** vypracoval(a) samostatne s použitím odbornej literatúry a prameňov, uvedených v zozname, ktorý tvorí prílohu tejto práce.

---

Dátum

---

Meno a priezvisko

## **POĎAKOVANIE**

Ďakujem týmto Ing. Petr Kracíkovi, Ph.D.za cenné pripomienky, konzultácie a rady, ktoré mi poskytol pri vypracovaní záverečnej práce.

-----  
podpis



## OBSAH

ÚVOD.....	11
1 Vzduchem chlazené kondenzátory.....	12
1.1 Typy vzduchem chlazených kondenzátorov .....	12
1.2 Segmenty vzduchových kondenzátorov .....	13
1.3 Typy trubiek používaných vo vzduchových kondenzátoroch .....	14
1.4 Usporiadanie trubiek v kondenzátoroch .....	14
2 Analytický návrh skúšobného zariadenia .....	18
2.1 Zadané parametre .....	18
2.2 Časť A zariadenia .....	20
2.3 Časť B zariadenia.....	20
2.4 Časť C zariadenia.....	21
2.5 Analytický výpočet prúdenia v zariadení .....	21
3 CFD návrh: variant 1 skúšobného zariadenia.....	24
3.1 Nastavenie CFD simulácií .....	24
3.1.1 Porovnanie výpočtových modelov .....	24
3.1.2 Materiál využitý v simuláciách .....	24
3.2 Návrh varianty 1 .....	25
3.3 Geometrický návrh navádzacích lopatiek.....	27
3.4 Porovnanie nábehových uhlov lopatiek .....	30
3.5 Finálny návrh varianty 1 a zhodnotenie.....	32
4 CFD návrh: variant 2 skúšobného zariadenia.....	35
4.1 Návrh varianty 2 .....	35
4.2 Návrh difúzoru .....	35
4.3 Porovnanie výsledkov difúzorov .....	36
4.4 Výsledky varianty 2 .....	39
ZÁVĚR.....	43
ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV .....	44
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	46
ZOZNAM OBRÁZKOV .....	47
ZOZNAM TABULIEK .....	49



## ÚVOD

Táto bakalárska práca sa zaoberá návrhom skúšobného zariadenia pre vzduchom chladené parné kondenzáty. V prvej kapitole sa práca venuje popisu už existujúcich zariadení ktoré sú určené pre odvod tepla z technologických procesov vo vzduchom chladených kondenzátoroch. Ďalšia časť práce sa venuje analytickému popísaniu prúdenia pre porubné rozvody a určením strát v zariadení. Dôležitou súčasťou tohto kroku je predvídať správanie v zariadení a vytýčenie okrajových podmienok pre ďalšie kroky návrhu. V praktickej časti je navrhnuté experimentálne zariadenie ktoré využíva princípy už existujúcich zariadení popísaných v predošlých kapitolách. Okrajové podmienky využíva návrh len ako všeobecne zadanie ktorého sa má držať a nefixuje sa na konkrétne hodnoty. Návrh zariadenia sa skladá z niekoľkých na seba navažujúcich častí: návrh prúdenia v určených sekciách zariadenia, konštrukčnom návrhu jednotlivých sekcií a overeníu návrhu pomocou CFD simulácií. Pre konštrukčný návrh bude využitý software Autodesk Fusion 360 a pre simulácie prúdenia v zariadení ANSYS Fluent so študentskou licenciou.

Cieľom návrhu tohto zariadenia je použiť využívané princípy z návrhu vzduchových kondenzátorov a prúdenia v potrubí. Práca sa snaží nadviazať na už známe koncepty z oblasti chladenia a tvorby potrubných systémov. Všeobecné okrajové podmienky pre návrh sú také aby zariadenie dosiahlo čo najmenšie rozmerové veľkosti a zároveň zachovalo vstupné hodnoty a neupravovalo návrhové parametre. Segmenty ako difúzory a navádzacie lopatky boli navrhnuté na základe odporúčaní z literatúry a optimalizované na základe simulácií. Cieľom je tak isto udržať náklady na prevedenie čo najnižšie a zabrániť predraženiu zariadenia. Dôležité pre návrh je aj to, aby nebol funkčný len pre 1 návrhový bod, alebo len pre jedno usporiadanie trubiek v ktorých budú prúdiť parné kondenzáty.

Toto zadanie bakalárskej práce som si zvolil z viacerých dôvodov a to možnosť využiť široké spektrum znalostí a schopností nadobudnutých za štúdium. Zaujala ma taktiež možnosť prepojenia analytických výpočtov a teoretických znalostí s praktickým zadáním ktoré je potrebné navrhnuť, otestovať, optimalizovať a následne tak pripraviť na fyzické prevedenie.

## 1 Vzduchem chlazené kondenzátory

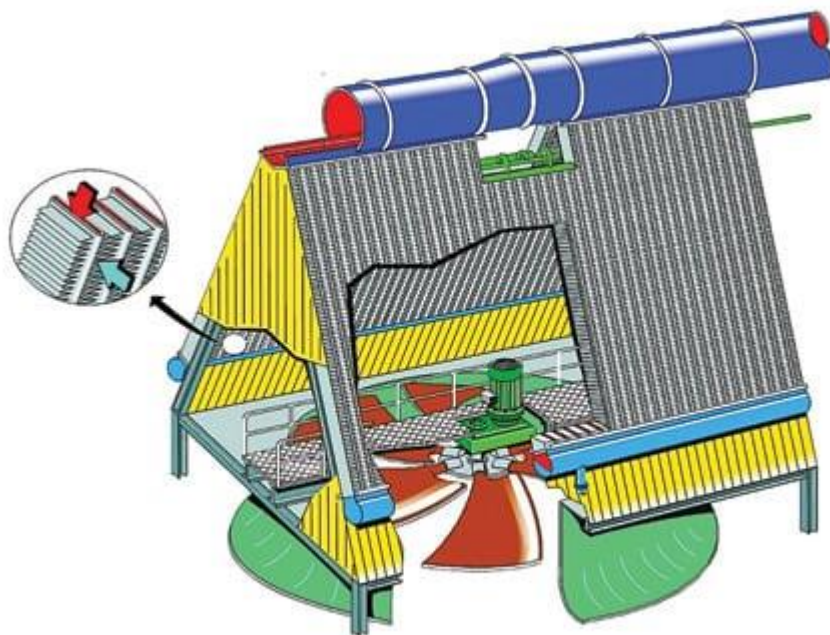
Kondenzátor je zařízení které slouží k odvodu zbyškového tepla a napomáhá tak teplonosnému médiu ochladit se na potřebnou teplotu. Základné delenie je podľa média, ktoré odoberá zvyškové teplo. Podľa tohto kritéria rozlišujeme kondenzátory na vodné a vzduchové. Tieto zariadenia sa vyskytujú v rôznych prevedeniach, od veľmi malých domácich zariadení (mraznička) až po veľké celky v priemysle (napríklad kondenzátory parných turbín) [1]. Spektrum prevedení je obrovské z dôvodu veľkého množstva požadovaných parametrov na zariadenia. S ohľadom na to, že sa táto bakalárska práca zaoberá experimentálnym skúšobným zariadením, ktorého účelom je ofukovať trubky vo vnútri zariadenia zároveň tak odoberať teplo médiu prúdiacemu v trúbkách sa bude ďalšia časť zaoberať len vzduchom chladenými kondenzátormi

### 1.1 Typy vzduchom chladených kondenzátorov

Základné typy vzduchových kondenzátorov možno rozdeliť podľa mnohých hľadísk. Jedným z hľadísk je typ prúdenia vzduchu vo vnútri kondenzátoru. Základným typom je kondenzátor s prirodzeným alebo vynúteným prúdením. Kondenzátor s prirodzeným prúdením využíva prirodzené prúdenie na prechod tepla a odvod radiácie tepla. Nízky prietok vzduchu spôsobený malými rýchlosťami v tomto type má za následok to, že prenos tepla je tak isto nízky. Výsledkom sú relatívne veľké plochy potrebné pre odovzdanie tepla. Pre prevedenie kondenzátoru sa najčastejšie využívajú dosky alebo rebrované rúrky. Tento typ má uplatnenie hlavne pri nízko-kapacitných chladiarenských systémoch: domáce chladničky, mrazničky.

Druhým typom je kondenzátor s vynúteným prúdením. Ako je už z názvu poznať, cirkuláciu vzduchu vo vnútri kondenzátoru zabezpečuje príslušné dúchadlo alebo ventilátor. Kondenzátor zväčša využíva v návrhu rebrá pre jednoduchšiu výmenu tepla. Využitie nájdeme hlavne vo vzduchotechnických jednotkách a klimatizáciách. Typicky je rýchlosť vzduchu v ekonomicky prispôbovaných kondenzátoroch medzi 2 m/s a 3,5 m/s [2]. Rýchlosť prúdenia vzduchu je ale obmedzená a to kvôli vznikajúcej vibrácii pri poklese tlaku. Obmedzenie rýchlosti vzniká aj kvôli hlučnosti ventilátorov.

Typy kondenzátorov je možné deliť taktiež podľa druhu teplonosného média. Primárne teplonosné médium buď voda alebo para kvôli ich dostupnosti, cene a možnosti naberať vysokých teplôt. Alternatíva využívať vzduch ako teplonosné médium nieje veľmi využívaná z praktického hľadiska. Medzi kondenzátory, ktorých teplonosné médium je voda alebo para, sa radia chladiace veže [3] s vynúteným aj prirodzeným ťahom podtlakové a pretlakové výmenníky (obr.1.2) a vzduchom chlazené kondenzátory: A-typy (obr.1.1). Všetky spomenuté typy fungujú podobným spôsobom: ofukovanie trubiek a odobranie tepla médií ktoré prúdia v trúbkách. Voľba chladiaceho zariadenia s použitím vzduchu sa odvíja od niekoľkých parametrov: rozmery zariadenia, množstvo odovzdaného tepla, energetické straty, údržba a náchylnosť na vonkajšie podmienky prostredia.



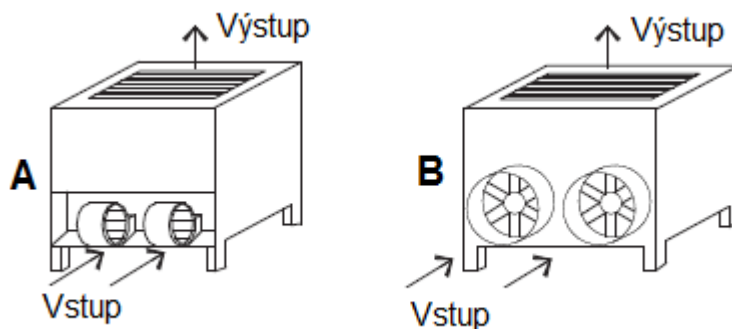
Obr. 1.1 Kondenzátor A-typ[4]

## 1.2 Segmenty vzduchových kondenzátorů

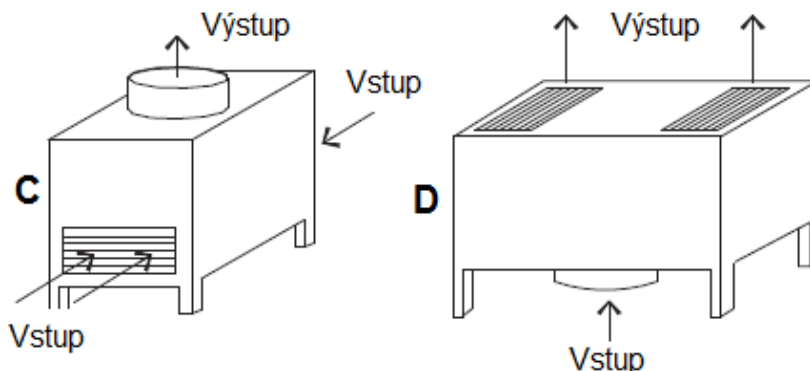
Vzduchovo chlazené kondenzátory sú jednoduchšie na konštrukciu pretože nevyžadujú špeciálne trubky na vedenie vzduchu. Využívaná teplota vzduchu sa pohybuje zhruba od 6 do 22° C. Kondenzátor sa veľmi nezanáša a tak sú náklady na údržbu a prevádzku nízke. Na rozdiel od vodou chlazených kondenzátorov je cena niekoľko krát vyššia.

Vstup chladiva je zväčša umiestnený v hornej časti kondenzátora s prirodzeným prúdením aby prúdenie v trúbkách bolo následne spôsobené gravitáciou. Výstup je z tohto dôvodu umiestnený v spodnej časti. Prúdenie samotného vzduchu môže byť vertikálne aj horizontálne

Vstup a výstup u kondenzátorov s vynúteným prúdením je rôzny[5] ako je možné vidieť na obrázku 1.2 a obrázku 1.3.



Obr. 1.2 A) Kondenzátor prefukovaný radiálním ventilátorem B) Kondenzátor prefukovaný axiálním ventilátorem[5]



Obr. 1.3 C) Podtlakový kondenzátor s indukovaným ťahom D) Pretlakový kondenzátor s vynúteným ťahom[5]

Vynútený ťah znamená, že vzduch je udržiavaný nad hodnotou atmosférického tlaku, zväčša pomocou ventilátora. Indukovaný ťah je spôsobený pomocou postupného znižovania tlaku až na atmosférický tlak tak, že vznikne komínový efekt[6].

Okrem ventilátorov sú kondenzátory zložené ešte z trubiek ktorými prúdi ochladzované médium a celkovú konštrukciu ktorá sa líši v každom type.

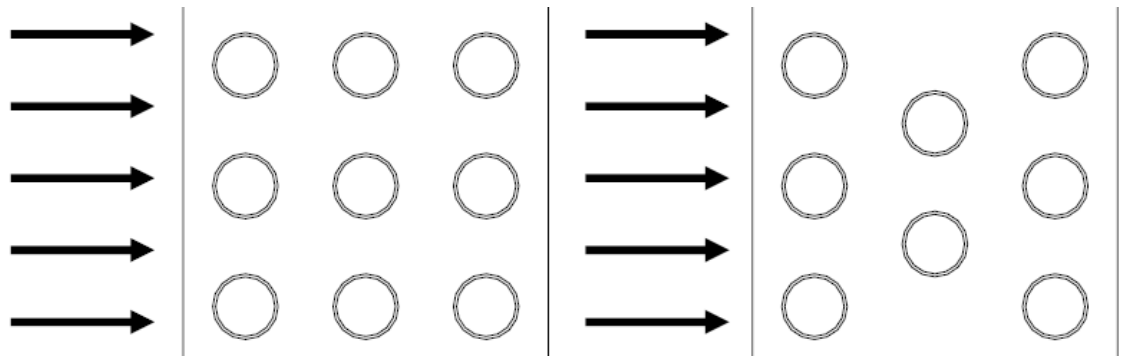
### 1.3 Typy trubiek používaných vo vzduchových kondenzátoroch

Materiály jednotlivých trubiek ako aj celých plášťov sa líšia v závislosti na aplikácií. Od materiálov je očakávaná odolnosť voči korózii[7], správne mechanické vlastnosti s ohľadom na osciláciu, schopnosť odolať pracovným tlakom a teplotám. Najčastejším materiálom trubiek a rebier kvôli ich vlastnostiam býva meď, hliník a oceľ. Pre otvorené sústavy je možné použiť aj materiál ako mosadz, kupronikel alebo uhlíkovú oceľ pre spätné získavanie tepla. Materiál jednotlivých trubiek nemusí ostať rovnaký ale môže sa meniť v závislosti na teplotnom spáde prúdu v prípadoch keď sa nachádza za sebou niekoľko rád trubiek za účelom tepelnej výmeny.

Tvar trubiek sa môže líšiť na základe tlakových podmienok. Okrúhle trubky sú využívané hlavne v prostredí s vysokým tlakom, zatiaľ čo hranaté trubky sú limitované svojou odolnosťou a preto sa využívajú len v nízko tlakých aplikáciách. Výhodou eliptických alebo plochých trubiek je väčší teplotný prestup a vznik menšieho tlakového spádu.

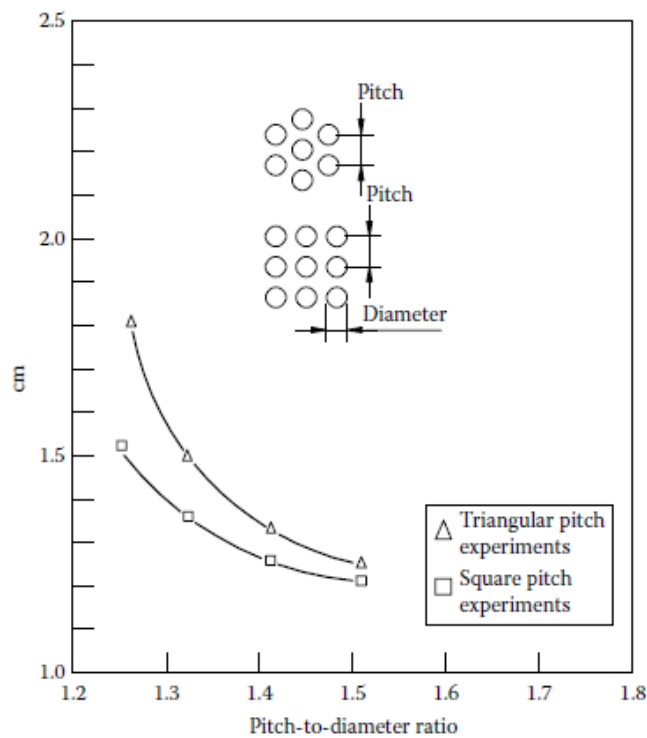
### 1.4 Usporiadanie trubiek v kondenzátoroch

Trubky v kondenzátore, ktorými prechádza chladivo sa zväčša umiestňujú do dvoch až ôsmich radov. Vzduch prúdi cez rebrá alebo medzi trubkami zatiaľ čo chladivo prúdi v trubkách. Dva základné princípy usporiadania sú odstupňované usporiadanie a usporiadanie za sebou. Tieto 2 typy usporiadania je možné vidieť na obrázku 1.5. Rozdiel medzi usporiadaním je len vo vyosení každej druhej rady o polovicu vzdialenosti medzi dvoma trubkami. Výsledkom tohto posunutia je vyšší prestup tepla sprevádzaný väčším usadzovaním a upchávaním v medzi trubkovom priestore

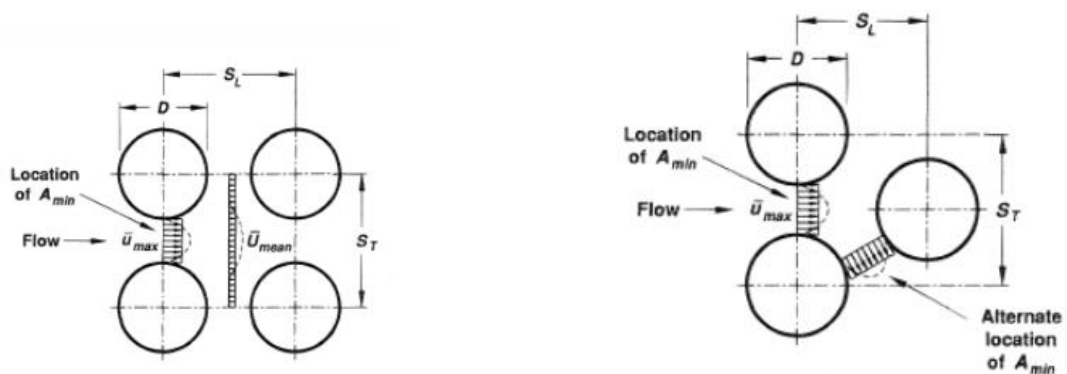


Obr. 1.4 Základné možnosti usporiadania trubiek vo vzduchovom kondenzátore [8]

Dynamika prúdenia v týchto 2 usporiadaniach sa tak isto od seba líši. Pozorovať to môžeme napríklad v amplitúde kmitania ktorá vzniká počas prúdenia.



Obr. 1.5 Porovnanie vlastných amplitúd odstupňovaného a za sebou usporiadania[8]

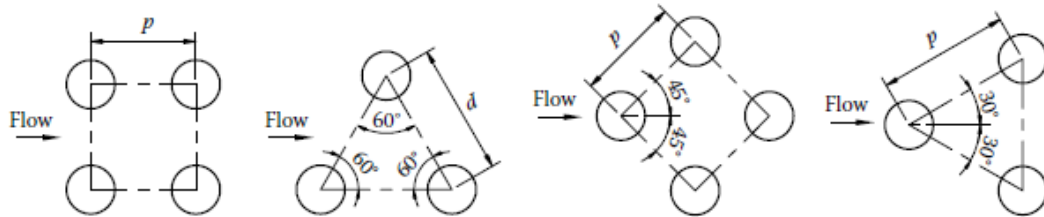


Obr. 1.6 Okótované usporiadanie trubiek a naznačené maximálne rýchlosti[8]

Najväčšie rýchlosti sa nachádzajú medzi trúbkami tým, že samotné trubky blokujú prúd vzduchu. Maximálna rýchlosť medzi trúbkami sa dá vypočítať ako

$$c_{max} = \left(\frac{\dot{V}}{S}\right) \frac{St}{St - d} \quad (1.1)$$

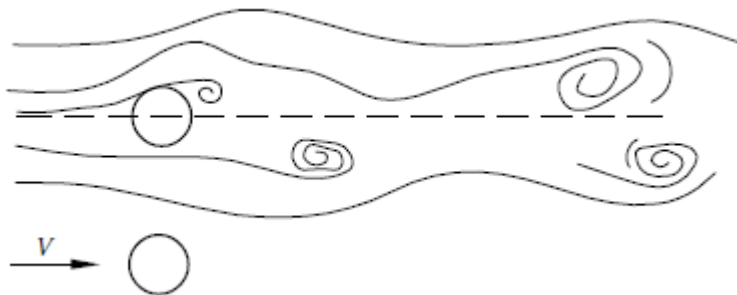
kde  $St$  je vzdialenosť medzi jednotlivými trúbkami,  $d$  je priemer trubky,  $\dot{V}$  je objem prúdu za sekundu vstupujúci do plochy kondenzátora  $S$  z pohľadu prúdenia.



Obr. 1.7 Ďalšie príklady rozmiestnenia trúbek[8]

Voľba výsledného usporiadania závisí z veľkej časti na rozmeroch Reynoldsovho a Eulerovho čísla. Výskum prúdenia medzi trúbkami prebieha už zhruba 80 rokov. Za tento čas vzniklo mnoho bezrozmerných alebo empirických vzťahov pre prúdenia od malých, po veľké Reynoldsovo číslo, ktoré napomáhajú pri voľbe usporiadania trúbek.

Príkladom takéhoto bezrozmerného parametru môže byť Strouhalove číslo. Toto číslo popisuje akustické vlastnosti prúdu a pravidelné odtrhávanie vírov za valcovými telesami. Každé odtrhnutie víru spôsobuje tlakový rozdiel v blízkosti obtekaného telesa čo následne spôsobuje zmenu silových účinkov na teleso[9]. Význam má Strouhalové číslo v súvislosti s frekvenciami. Ak obtekané teleso dosiahne vlastnú frekvenciu spôsobenú odtrhávaním vírov, amplitúda môže vzrásť natoľko, že bude poškodená trubka, poprípade úplne odtrhnutá. V trubkovom usporiadaní tak vznikne potenciál vysokých škôd. Pri zvýšenej amplitúde vzrastá aj množstvo otrhávania výrov[7].



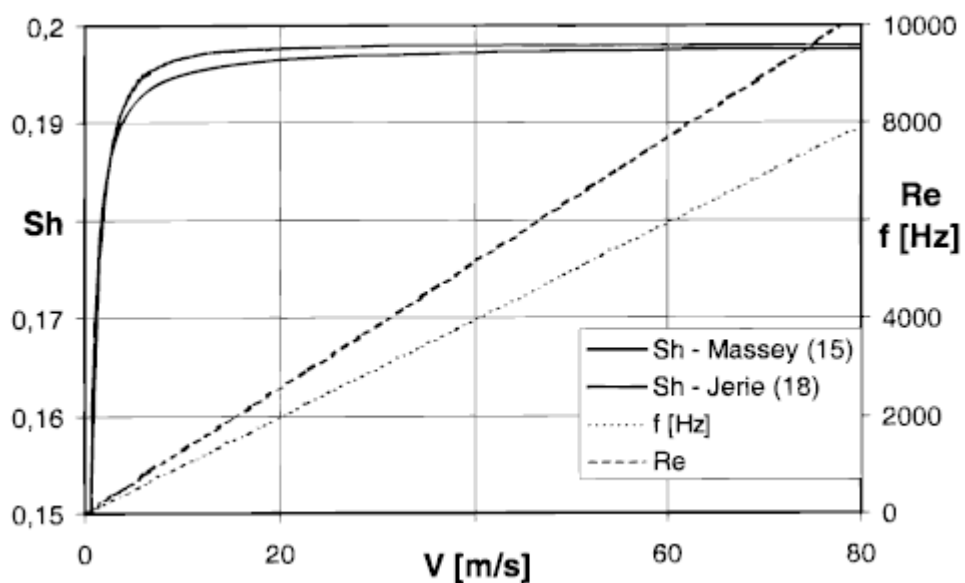
Obr. 1.8 Odtrhávanie vírov za trúbkou

Strouhalovo číslo získame ako vzťah medzi frekvenciou odtrhávania prúdu, priemerom trubky a rýchlosťou prúdenia  $c$ .

$$Sh = \frac{fd}{c} \quad (1.2)$$



Číslo bolo niekoľko krát experimentálne overené a následne aproximované. Najpresnejšie výsledky dostali Massey a Jarie.



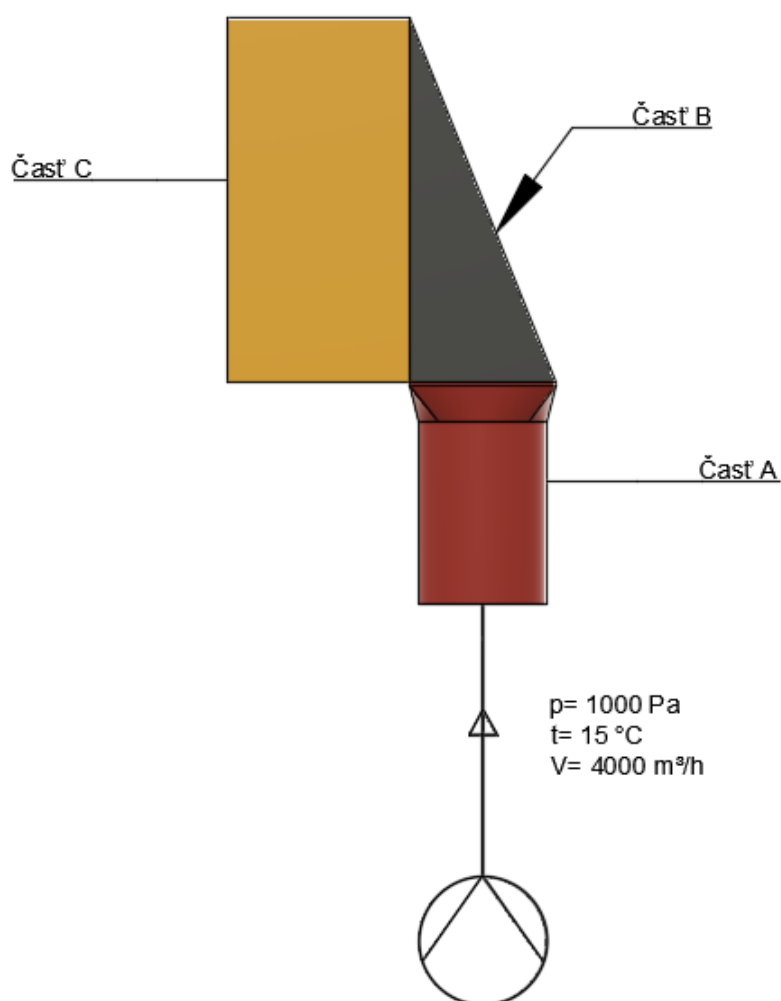
Obr. 1.9 Porovnanie aproximácií Strouhalového čísla Massey a Jarierom[10]

## 2 Analytický návrh skúšobného zariadenia

Návrhu samotného skúšobného zariadenia predchádzal analytický návrh, ktorý sa snažil čo najviac uľahčiť samotnú tvorbu a simulácie pri návrhu zariadenia. Tento návrh sa stal následne podkladom pre numerické overenie návrhu. Teoretický základ pre tento návrh súvisel hlavne s mechanikou tekutín a konštrukciou jednotlivých častí. Návrh je rozdelený na niekoľko častí tak aby jednotlivé segmenty boli čo najviac samostatne vyladené a popísané ešte pred tým, než sa pospájajú do kopy. Rozdelenie jednotlivých častí je možné vidieť na obrázku 2.1. Zariadenie sa skladá z častí A, B, C ktoré sú popísané ďalej v tejto kapitole ...

### 2.1 Zadané parametre

Skúšobné zariadenie má slúžiť ako veterný tunel, v ktorom budú umiestnené trubky, v ktorých bude kondenzovať para a budú ofukované vzduchom. Počas ofukovania bude možné experimentovať s usporiadaním trubiek, materiálom trubiek a priemerom trubiek. Skúšobné zariadenie ma umožniť dokonalé prostredie pre tvorenie experimentov vo vnútri zariadenia. Ofukovanie vzduchom je zabezpečené ventilátorom. Zariadenie by malo mať čo najmenší rozmer a zároveň hodnoty prúdenia vo vnútri by mali byť čo najviac rovnomerné po ustálení prúdenia.



Obr. 2.1 Schéma skúšobného zariadenia

Vynútené prúdenie v skúšobnom zariadení zabezpečené jednosmerne sacím radiálnym ventilátorom, zapojeným na priamo od firmy Ferrari Ventilatori Industriali spa. Model ventilátoru je FR 351 N. Základné parametre sú[11]:

Výkon ventilátora

$$P = 3 \text{ kW} \quad (2.1)$$

Otáčky

$$n = 2900 \text{ RPM} = 303,687 \text{ rad/s} \quad (2.2)$$

Maximálny prietok

$$\dot{V}_{max} = 8350 \text{ m}^3/\text{h} \quad (2.3)$$

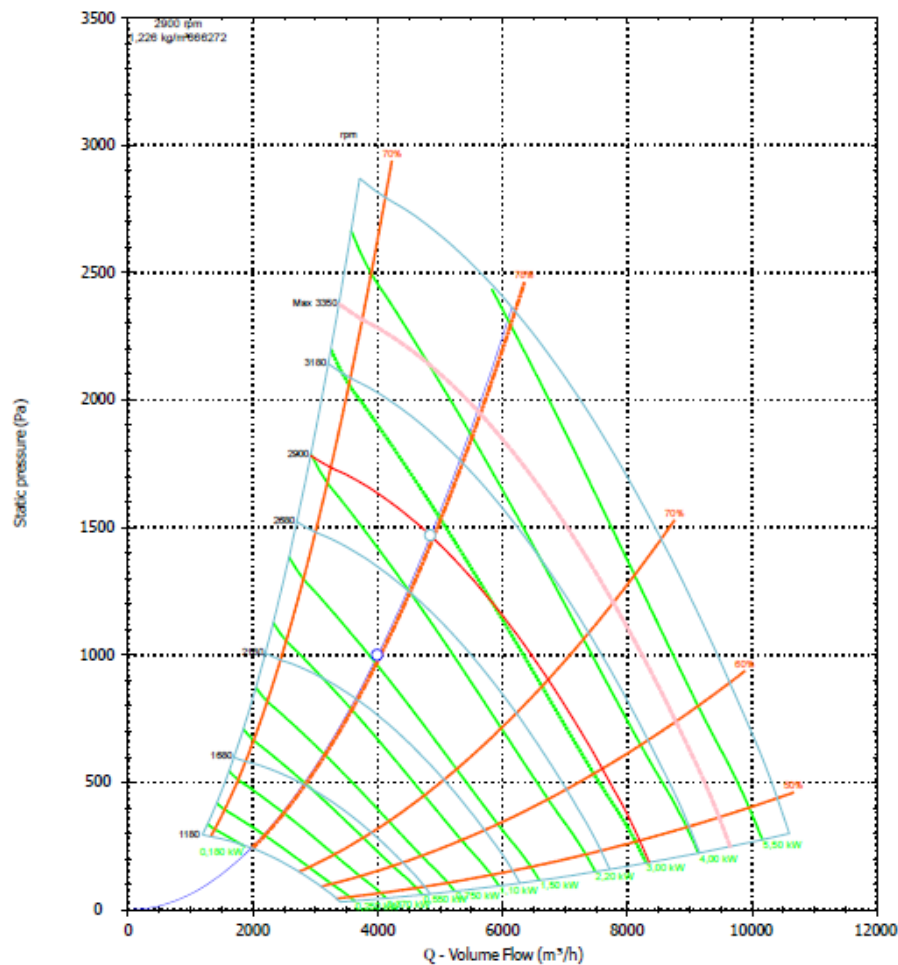
Hustota vzduchu

$$\rho = 1,226 \text{ Kg/m}^3 \quad (2.4)$$

Absolútny tlak

$$p = 1467 \text{ Pa} \quad (2.5)$$

Na obrázku 2.2 sú návrhové krivky ventilátora pre rôzny počet otáčok. Návrhový bod ventilátora je určený na výkone 4000 m<sup>3</sup>/h a statickom tlaku 1000 Pa.



Obr. 2.2 Návrhové krivky ventilátoru FR 351 N[12]

## 2.2 Časť A zariadenia

Vstupná časť A je prepojením medzi ventilátorom a zvyškom zostavy. Z ventilátora vystupuje vzduch kruhovým prierezom o veľkosti 350 mm. Z praxe vyplýva, že napojenie ventilátora musí byť pružné kvôli vibráciám, ktoré sú spôsobené malou nevyváženosťou na rotore. Nepružné napojenie opotrebovávajú ložiska pretože sa v nich hromadí sila ktorá je spôsobená nevyváženosťou.

Prepojenie medzi ventilátorom a samotnou časťou A bude prevedené pružnou hadicou. Hadica nie je vhodná na napojenie rovno z ventilátora do zvyšku zariadenia a to kvôli niekoľkým dôvodom: čím dlhšia hadica bude, tým bude narastať aj tlaková strata, dlhšia hadica sa skôr opotrebuje. Zároveň je ale hadica potrebná ak by sa so zariadením v budúcnosti manipulovalo alebo by bolo vertikálne/ horizontálne natáčané.

Časť A je zložená z dvoch komponentov: trubky s priemerom 350 mm a difúzorom ktorý slúži ako napojenie na ďalšie časti. Trubka má rovnaký priemer ako výstup z ventilátora a pružná hadica. Je to spôsobené tým, aby sa skutočné parametre vychádzajúce z ventilátora líšili minimálne od tých ktoré vstupujú do zariadenia. Dĺžka trubky je v analytickom návrhu zanedbateľná a neurčujeme ju. Trubka má slúžiť len ako ustálovacia časť pre prúd ktorý vstúpi do zariadenia. Dĺžka je zvolená štandardne 0,5 metru, pri simuláciách sa táto dĺžka neskôr skracovala pre urýchlenie a spresnenie výpočtu ( počet buniek siete bol obmedzený a kratšou ustálovacou časťou mohol byť spresnený výsledok v dôležitejších miestach).

Difúzor je súčasťou návrhu z dôvodu, že časti B a C sú hranatého tvaru. Difúzor je zvolený z dôvodu minimalizácie zmien v prúde. Bez použitia difúzoru by mohli v zariadení vzniknúť víry (obr. 2.3) a celková výsledná rýchlosť by tak bola znížená. Analytický návrh počíta s dĺžkou difúzoru 0,2 metra.



Obr. 2.3 Náčrt všeobecného difúzoru

V simuláciách bolo neskôr navrhnutých niekoľko variant pre lepšie pochopenie ako sa správa výsledný prúd. Na základe výsledkov boli potom difúzory optimalizované a zvolený jeden pre modely.

## 2.3 Časť B zariadenia

Časť B je prepojenie medzi difúzorom časti A a časťou C. Jedná sa o rozmerovo čo najmenší prechod spôsobený tomu aby vzduch vystupujúci vertikálne z dýzy naklonil o 90° a pokračoval v horizontálnom smere v časti C.

Část B sa teda dá nazvať prechodovým kolenom so vstupom 400×400 mm a výstupom 400×1000 mm. Rádus v tomto atypickom kolene je 0 a to z dôvodu zachovať prechod rozmerovo čo najmenší. Vonkajšia hrana tohto prechodu má tak isto rádus 0 a je teda navrhnutá ako úsečka. Počas simulácií prúdenia vznikla myšlienka navrhnuť túto vonkajšiu hranu ako krivku čo by mohlo napomôcť usmerneniu prúdu. Od návrhu bolo odstúpené kvôli skomplikovaniu celkového geometrického návrhu ako aj samotného prevedenia kedy by táto hrana musela byť zložená z segmentov, čím by stratila presnosť.

## 2.4 Časť C zariadenia

Časť C slúži ako hranaté potrubie v ktorom sa vyrovná prúdenie a rýchlosť vzduchu. Rozmer je 400 mm na 1000 mm (šírka× výška). Dĺžka časti závisí na výsledkoch prúdenia a skladá sa z dĺžky potrebnej pre ustálenie prúdenia a dĺžky potrebnej pre trubkové usporiadanie.

Po tom, čo je určená vzdialenosť pre ustálenie prúdu je možné vkladať trubky do skúšobného zariadenia a pozorovať tak prúdenie medzi trúbkami a prechod tepla. Za časťou C by nemalo podľa zadania začínať ďalšie zariadenie takže tlak na výstupe bude atmosférický.

## 2.5 Analytický výpočet prúdenia v zariadení

Návrhový bod ventilátoru, pre ktorý je navrhnutý celý analytický výpočet, je stanovený na výkone 4000 m<sup>3</sup>/h. Priemer vstupu v časti A je 350 mm. Rýchlosť prúdenia vzduchu  $c$  je z rovnice kontinuity pre nestlačiteľne prúdenie

$$c = \frac{\dot{V}}{S} = \frac{4000}{3600}{0,175^2 \cdot \pi} = 11,55 \text{ m/s} \quad (2.6)$$

Z technického listu pre ventilátor FR 351 N [12] a online tabuliek [13] poznáme ďalšie parametre návrhového bodu: hustotu suchého vzduchu pri 15°C je 1,266 Kg/m<sup>3</sup> a kinematickú viskozitu vzduchu pre 15°C ktorá je 1,470 · 10<sup>-5</sup> m<sup>2</sup>/s. Rýchlosť po vyrovnaní prúdu v časti C je tak následne určená zo zákona zachovania hmotnosti a objemu kde  $\dot{V}_1$  je objemový prietok na vstupe a  $\dot{V}_2$  je objemový prietok na výstupe zariadenia

$$\dot{V}_1 = \dot{V}_2 \quad (2.7)$$

a teda platí že, pomer vstupnej a výstupnej rýchlosti prúdu sa rovná pomeru vstupnej a výstupnej plochy zariadenia, takže vieme určiť rýchlosť po ustálení prúdenia v časti C

$$\frac{c_1}{c_2} = \frac{S_1}{S_2} \quad (2.8)$$
$$c_2 = \frac{S_2}{S_1} \cdot c_1 = \frac{0,4 \cdot 1}{0,175^2 \cdot \pi} \cdot 11,55 = 2,77 \text{ m/s}$$

Z Bernuliho rovnice následne určíme približný tlak ktorý by mal byť v časti C po tom, čo sa ustáli prúdenie. Rovnica sa skladá z niekoľkých parametrov:  $p_2$  je tlak ktorý sa nachádza v časti C,  $p_1$  je tlak na vstupe do skúšobného zariadenia,  $c_2$  je rýchlosť prúdu v časti C po ustálení,  $c_1$  je rýchlosť na vstupe do zariadenia,  $g$  je gravitačné zrýchlenie a  $h$  je výška ktorú musí prúd vertikálne prekonať, čiže dĺžka samotnej časti A

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{c_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{c_2^2}{2} + gh = \text{konšt.} \quad (2.9)$$

$$p_2 = \rho \cdot \left( -\frac{c_2^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + \frac{c_1^2}{2} - gh \right) =$$

$$= 1,226 \left( -\frac{2,77^2}{2} + \frac{1000}{1,266} + \frac{11,55^2}{2} - 9,81 \cdot 0,7 \right)$$

$$\doteq 1074,6 \text{ Pa}$$

Reynoldsovo číslo pre hranaté potrubie v mieste ustálenia vypočítame ako:

$$Re = \frac{c_2 \cdot Deq}{\mu_k} \quad (2.10)$$

kde  $\mu_k$  je kinematická viskozita pre danú teplotu a  $Deq$  je hydraulický parameter pre hranaté potrubie ktorý sa spočíta ako:

$$Deq = \frac{4 \cdot S_2}{2 \cdot (a + b)} = \frac{4 \cdot 0,4 \cdot 1}{2 \cdot (0,4 + 1)} = 0,5714 \quad (2.11)$$

Po dosadení sa teda Reynoldsovo číslo sa rovná približne

$$Re = \frac{c_2 \cdot Deq}{\mu_k} = \frac{2,77 \cdot 0,5714}{1,470 \cdot 10^{-5}} = 1,077 \cdot 10^5$$

Táto hodnota napovedá tomu, že prúd bude v ustálovacej časti C turbulentný čo bude neskôr dôležité pre simulovanie prúdu.

Z rozšírenej verzie Bernuliho rovnice pre straty [14] vieme presnejšie určiť parametre v mieste kde bude rýchlostné pole ustálené.

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{c_1^2}{2} + gh_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{c_2^2}{2} + gh_2 + \Delta P \quad (2.12)$$

V návrhu skúšobného zariadenia sa nachádza niekoľko miest ktoré spôsobujú straty. Tieto straty sa započítajú do konečnej Bernuliho rovnice ako:

$$\Delta P = \frac{\left(\frac{\lambda l}{d}\right) \rho c^2}{2} + \Sigma \xi \rho \frac{c^2}{2} \quad (2.13)$$

kde stratový trecí koeficient je  $\lambda$  a koeficient odporu jednotlivých častí je  $\xi$ .

Pre časť zariadenia A získame  $\lambda$  najprv výpočtom Reynoldsovho čísla [14] kde  $d$  je priemer potrubia ktorým prúdi kvapalina

$$Re = \frac{c_1 \cdot d}{\mu_k} = \frac{11,55 \cdot 0,35}{1,470 \cdot 10^{-5}} = 2,75 \cdot 10^5 \quad (2.14)$$

Pre túto hodnotu  $z$  je možné následne z Nikuradseho rovnice [14] pre  $10^5 < Re < 10^8$  dostať stratový koeficient  $\lambda_A$  ako

$$\lambda_A = 0,0032 + \frac{0,221}{Re^{0,237}} = 0,0032 + \frac{0,221}{(2,75 \cdot 10^5)^{0,237}} = 0,0145 \quad (2.15)$$

Pre vyrovňavaciu časť C určíme  $\lambda_C$  rovnakým spôsobom takže

$$\lambda_C = 0,0032 + \frac{0,221}{Re^{0,237}} = 0,0032 + \frac{0,221}{(1,077 \cdot 10^5)^{0,237}} = 0,0174 \quad (2.16)$$

Strata spôsobená rozšírením v potrubí, dýze na konci časti A zariadenia, ktorá má vstupný priemer 350 mm a výstup 400×400 mm je možné určiť pomocou tabuľky z obrázku 2.4. Najprv je ale potrebné vypočítať uhol dýzy  $\alpha$ :

$$tg \frac{\alpha}{2} = \frac{2 \cdot \sqrt{\frac{a \cdot b}{\pi}} - d}{2 \cdot l} = \frac{2 \cdot \sqrt{\frac{0,4 \cdot 0,4}{\pi}} - 0,35}{2 \cdot 0,2} \doteq 0,253 \quad (2.17)$$

$$\alpha \doteq tg^{-1}(0,507) \doteq 26,87$$

Values of  $\xi_{exp}$

$\frac{F_0}{F_1}$	$a_1$	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	24	28	32	40	60	80	100
0	$\infty$	0.03	0.06	0.10	0.14	0.19	0.23	0.29	0.34	0.40	0.45	0.59	0.73	0.89	1.05	1.10	1.10	1.10
0.05	20	0.03	0.05	0.09	0.13	0.17	0.21	0.26	0.31	0.36	0.40	0.53	0.66	0.80	0.94	0.99	0.99	0.99
0.075	13.3	0.03	0.05	0.08	0.12	0.16	0.20	0.25	0.29	0.34	0.38	0.50	0.62	0.76	0.90	0.94	0.94	0.94
0.10	10	0.02	0.05	0.08	0.11	0.15	0.19	0.24	0.28	0.32	0.36	0.48	0.59	0.72	0.85	0.89	0.89	0.89
0.15	6.7	0.02	0.04	0.07	0.10	0.14	0.17	0.21	0.24	0.29	0.32	0.42	0.52	0.64	0.76	0.79	0.79	0.79
0.20	5.0	0.02	0.04	0.06	0.09	0.12	0.15	0.18	0.22	0.26	0.29	0.38	0.47	0.57	0.67	0.70	0.70	0.70
0.25	4.0	0.02	0.03	0.06	0.08	0.11	0.13	0.16	0.19	0.22	0.25	0.33	0.41	0.50	0.59	0.62	0.62	0.62
0.30	3.3	0.01	0.03	0.05	0.07	0.09	0.11	0.14	0.17	0.20	0.22	0.29	0.36	0.44	0.51	0.54	0.54	0.54
0.40	2.5	0.01	0.02	0.04	0.05	0.07	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16	0.21	0.26	0.32	0.38	0.40	0.40	0.40
0.50	2.0	0.01	0.01	0.02	0.03	0.05	0.06	0.07	0.08	0.10	0.11	0.15	0.18	0.22	0.26	0.27	0.27	0.27
0.60	1.7	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.09	0.12	0.14	0.17	0.18	0.18	0.18	0.18

Obr. 2.4 Straty v difúzore pre prechod z kruhového prierezu na hranatý[15]

Hodnota v tabuľke  $\frac{F_0}{F_1}$  hovorí o pomere vstupnej a výstupnej plochy, čiže pre označenie v tejto práci  $\frac{S_0}{S_1}$  ktorého hodnota je  $\frac{0,175^2 \cdot \pi}{0,4 \cdot 0,4} = 0,601$ . Z pomeru plochy a uhlu dýzy tak na základe tabuľky na obrázku 2.4 určíme, že strata  $\xi_A$  je 0,12.

Všetky predošlé straty sme určili k tomu aby bolo možné určiť konečnú Bernuliho rovnicu pre prúd prechádzajúci zariadením

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{c_1^2}{2} + gh_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{c_2^2}{2} + gh_2 + \frac{\left(\frac{\lambda_A l_A}{d}\right) \rho c_1^2}{2} + \frac{\left(\frac{\lambda_c l_c}{d}\right) \rho c_2^2}{2} + \xi_A \rho \frac{c_1^2}{2} \quad (2.18)$$

### 3 CFD návrh: variant 1 skúšobného zariadenia

Variant 1 sa skladá z častí A, B a C ktoré boli popísané v predošlej kapitole na obrázku 2.1. Z analytického rozboru boli použité hodnoty ktoré sa následne stali okrajovými podmienkami pre CFD analýzu.

#### 3.1 Nastavenie CFD simulácií

Simulácie boli prevedené v software ANSYS Fluen so študentskou licenciou. Sieť bodov pre ktoré boli simulácie počítané bola vytvorená v softvare ANSYS Mechanical s nastavením tvorby siete pre výpočty CFD. Obmedzenie študentskej licencie v ANSYS Mechanical je 512 000 buniek.

Všetky simulácie prúdenia boli nastavené ako 3D simulácie s absolútnou rýchlosťou, bez časového kroku. Riešiteľ prúdenia bol založený na výpočte tlaku.

##### 3.1.1 Porovnanie výpočtových modelov

Štandardný model K-epsilon je založený na rovniciach kinetickej energie a disipačnej turbulencie. Pri simuláciách bol využitý len na začiatku- pri tvorení geometrie jednotlivých sekcií kanála. Výhodou je jeho jednoduchosť a rýchli výpočet. Neodporúča sa používať pri komplexnej geometrii (zložitý tvar prúdnic) a veľkých gradientoch tlaku [16]

Tento model využíva vzťah pre vypočítanie turbulentnej viskozity ktorá potom vstupuje do rovníc:

$$\mu_k = \frac{\rho C_\mu k^2}{\epsilon} \quad (3.1)$$

Pričom  $C_\mu = 0.09$  je konštanta pre tento model

Štandardný model K omega alebo Wilcoxov model je založený na rovniciach kinetickej energie a turbulentnej frekvencie. Pri simuláciách bol využitý od momentu nakláňania prúdu lopatkami v jednotlivých verziách. Výhodou je presnejší výsledok práve pri stenách v simulácií [17].

Tento model využíva kinetickú turbulentnú viskozitu:

$$\nu_t = \frac{k}{\omega} \quad (3.2)$$

SST model K omega je založený tiež na 2 rovniciach: turbulentnej kinetickej energie a disipácie. Model spája to najlepšie z oboch štandardných metód K-epsilon a K-omega. V praxi to znamená, že sa model prepne na správanie K-ε v častiach voľného prúdenia a v častiach geometrických sa prepne na správanie k-ω. Tento model bol využitý len pri finálnych verziách s odladenou geometriou lopatiek a samotného kanála [18].

##### 3.1.2 Materiál využitý v simuláciách

Materiál použitý v simulácií bol vzduch v prevedení ideálneho plynu. Ideálny plyn bol zvolený kvôli faktu, že hustota sa bude počas celej simulácie meniť podľa toho v ktorom mieste sa pozorovaný objem práve nachádza. Nemať konštantnú hustotu média taktiež napomôže pri výpočte cez lopatkový kanál ktorý funguje z časti ako dýza.



Ideální plyn so sebou prináša ešte jednu rovnicu - energetickú. Pre toto jednoduchšie zadanie nebol žiaden problém s konvergenciou energie. Počítanie energie prúdenia má za následok, že jednoduchý analytický výpočet pomocou Bernuliho rovnice nebude presný a tak sa výsledná rýchlosť pri ustálenom prúdení bude z časti líšiť od výsledku simulácie.

Materiál pevných častí v simulácii nebol definovaný. Neužnali sme za potrebné definovať ho, keďže v zadaní nie sú uvažované teplotné rozdiely a výmena energie. Všetky pevné časti sú definované ako steny v okrajových podmienkach. Uvažované základné parametre: steny sú statické- bez pohybu, bez šmyku, štandardnej drsnosti s koeficientom 0,5.

### 3.2 Návrh varianty 1

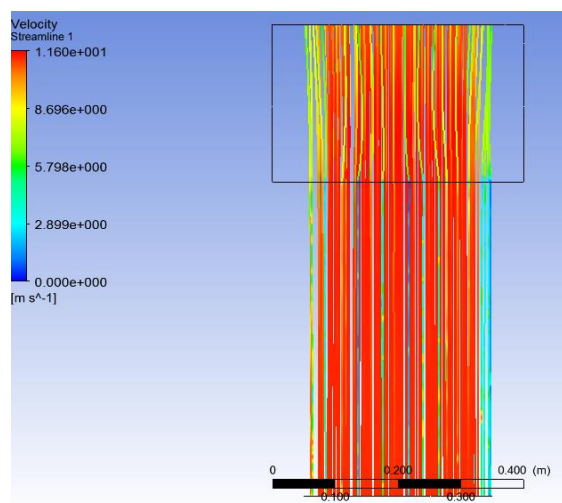
Ako prvé bola navrhnutá a optimalizovaná časť A. Zvolene boli 4 varianty:

A1- variant bez dýzového prechodu

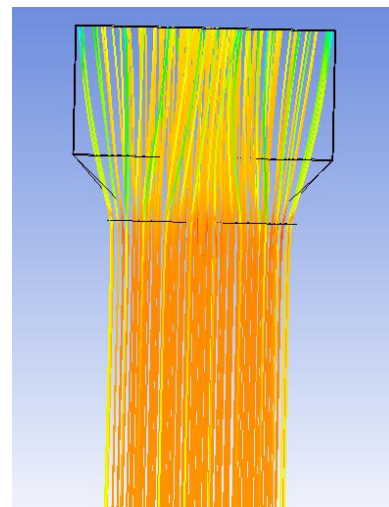
A2-variant s krátkym dýzovým prechodom 100 mm

A3-variant s krátkym dýzovým prechodom 100 mm, pridaná hranatá podstava na výstupe z trubky aby dýza bola prechod medzi 2 štvorcami

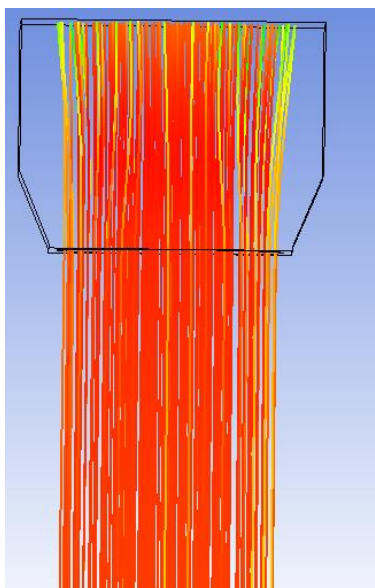
A4-varianta z predĺženou dýzou 200mm



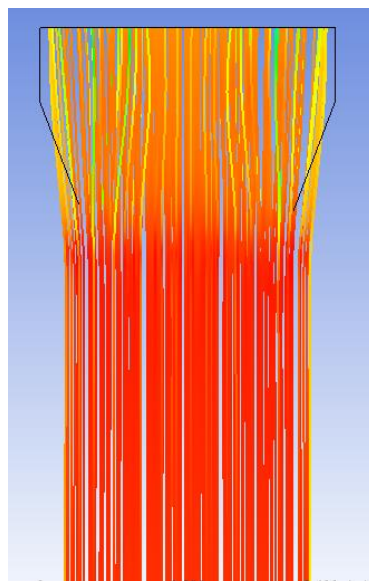
Obr. 3.1 Prúdenie časťou A1



Obr. 3.2 Prúdenie časťou A2



Obr. 3.3 Průdení částou A3

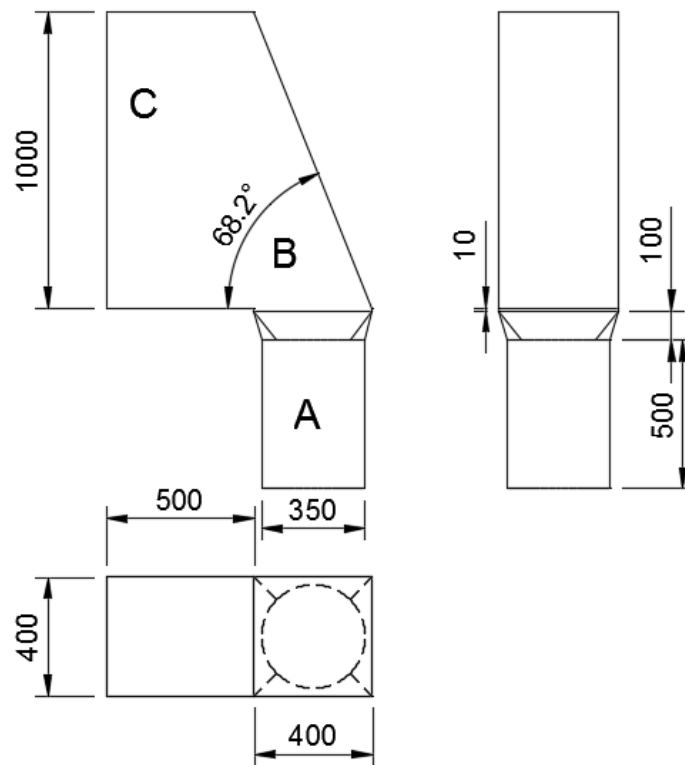


Obr. 3.4 Průdení částou A4

Z výsledků průdení v jednotlivých variantoch prechodu medzi vstupným kruhovým potrubím s priemerom 350 a vstupom do časti B zariadenia bola zvolená variant A2. Tento variant dosiahol najlepší výsledok v pomere rozvoľnenia prúdu a potrebnej dĺžky. Vo variante A4 bol dosiahnutý podobný výsledok rozvoľnenia prúdu ale zároveň bola vyžadovaná dlhšia prechodová časť.

Časť C bola navrhnutá len ako kocka s rozmermi  $400 \times 1000 \times 500$  mm (Š×V×D). Rozmer dĺžky sa počas finálnej optimalizácie predĺžil na 2000 a 3000 mm kvôli potvrdeniu vlastností prúdu vo vyrovnávacej časti.

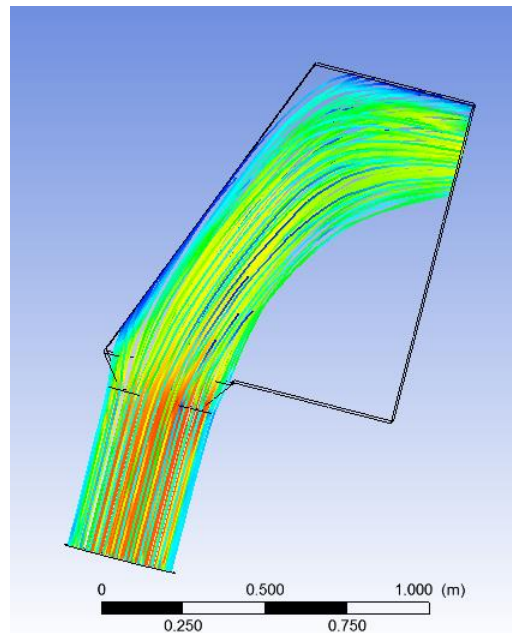
Časť B bola navrhnutá ako najrýchlejší prechod medzi časťou A a C. Jedná a o trojuholníkový tvar ktorý má napomôcť svojím tvarom ku sklopeniu prúdu z jeho vertikálneho smeru na horizontálny v skúšobnom zariadení.



Obr. 3.5 Výkres skúšobného zariadenia s označenými časťami.

### 3.3 Geometrický návrh navádzacích lopatiek

Po finálnom návrhu všetkých 3 častí z ktorých sa skladá zariadenie bolo možné zistiť samotné prúdenie vo vnútri.



Obr. 3.6 Prúdenie v tunely

Ako je možné vidieť z obrázka 3.6, pri zadanej rýchlosti a krátkej ústálovacej rovine nie je možné dosiahnuť zrovnomenie prúdenia v zariadení. Trojuholníková časť B pomáha len sklopiť prúd vzduchu o 90°. Na zrovnomenie prúdenia je potrebné teda navrhnuť lišty.

Cieľom týchto líšt je čo najviac rozložiť a zrovnomerniť prúdenie v tunely. Ich počet sa odvíja v závislosti na účinnosti pri ich použití. Pre výpočet bol zvolený variant 20, 12, 10, 6 a 4 líšt kde posledná líšta je určená ako šikmá stena kanálu (diel B)

Ako bude neskôr možné vidieť, navrhnutý program je pripravený tak, aby bol schopný prepočítať variantu s ľubovoľným počtom. Z výsledkov simulácií vyplýva, že s rozmerom kruhového vstupu 350 mm nieje nakoniec potrebné testovať variantu s 4 líštami.

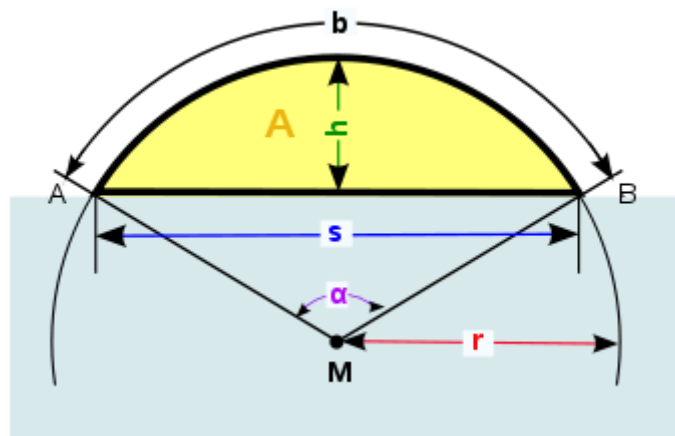
Tieto vzduchotechnické žalúzie boli navrhnuté tak, aby do ich výpočtu nevstupovali rýchlosti prúdenia, teplota ani tlak. Sú vytvorené len z nadväznosťou na už existujúcu geometriu vzduchového tunela.

Výstup z kruhového napájacieho potrubia je

$$\dot{v} = \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot \frac{\pi}{\Delta t} = \left(\frac{0,35}{2}\right)^2 \cdot \frac{\pi}{1} = 9,62 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.3)$$

Líšty majú slúžiť tak, aby sme rovnomerne rozdelili tento vstupný objem. Znamená to, že ak sa rozhodneme využiť variantu s 12 líštami, tak sa nám prúd rozdelí na 12 rovnakých objemov.

Najjednoduchším spôsobom sa javí určiť tieto líšty pomocou kruhového výseku. Pri verzii 12 líšt bude mať teda 1 takýto kruhový výsek objem zhruba  $0,8 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3$ . Každý ďalší kruhový výsek bude mať celkový objem rovný objemu predošlého kruhového výseku plus „nominálnej“ hodnoty určenej pre tento počet výsekov čiže  $0,8 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3$ .



Obr. 3.7 Náhl'ad na kruhový výsek [19]

Pre návrh jednotlivých líšt je nutné určiť ich hodnotu  $h$  ako je tomu na obrázku. Hodnotu dopočítame z už zadaných vstupných hodnôt polomeru a nami určeného „nominálneho“ objemu.

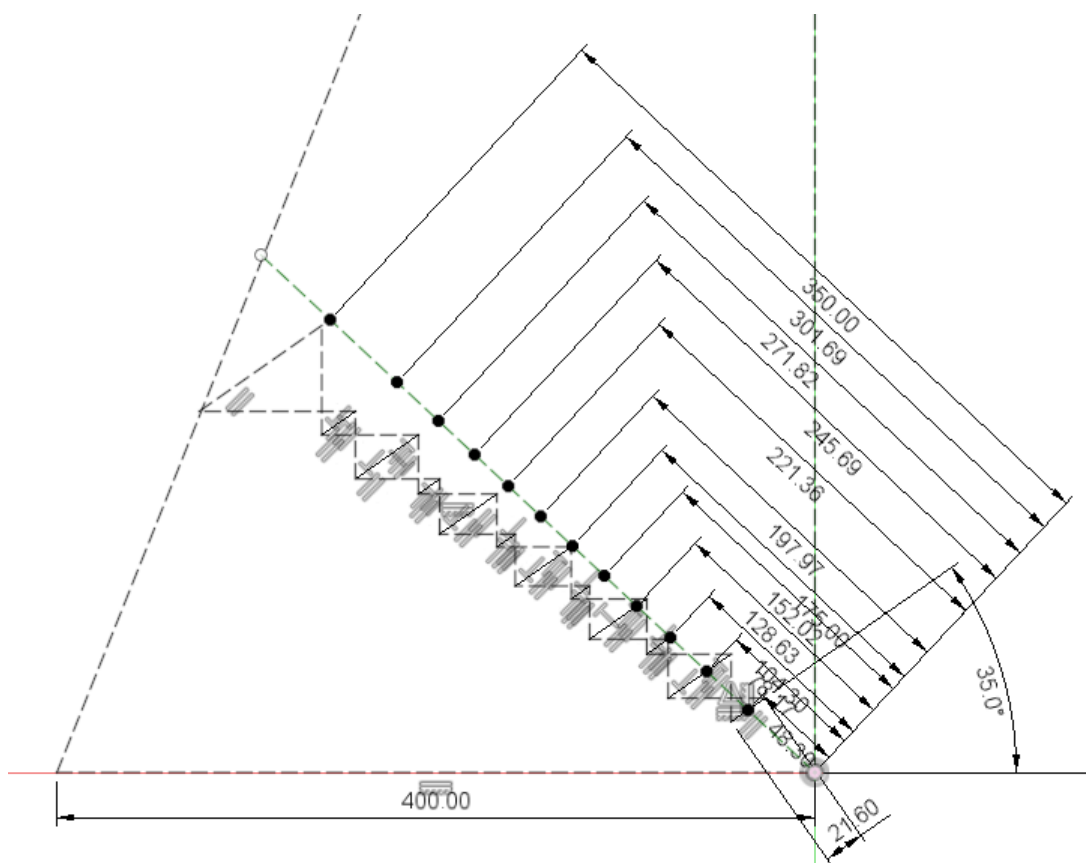
$$\alpha - \sin(\alpha) = \frac{V_{nom}}{0,5 \cdot R^2} \quad (3.4)$$

Vzorec je upravený na jeho najjednoduchšiu verziu, je potrebné si pomôcť nadstavbou Riešiteľ v Exceli ktorý určí presnú hodnotu  $\alpha$

Vďaka dopočítaným hodnotám  $\alpha$  pre jednotlivé lišty je možné určiť ich výšku  $h$  a tak rovnomerne rozdeliť prúd na zvolený počet segmentov.

$$h = R \cdot \cos\left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \quad (3.5)$$

Kontrolou správnosti výpočtu je informácia, že ak sa  $\alpha = 180^\circ$ ,  $h=R$ .

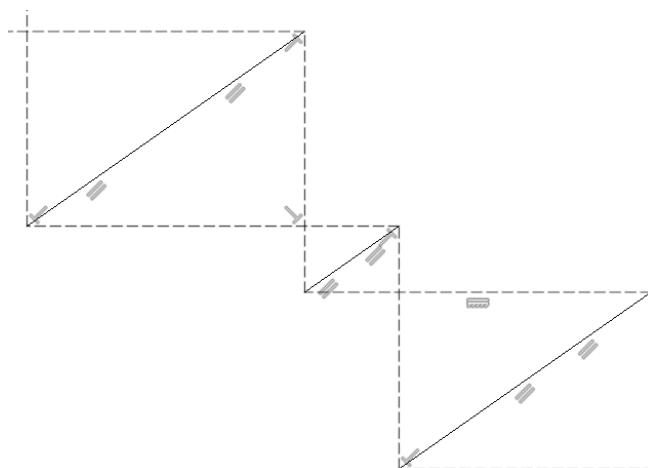


Obr. 3.8 Pohľad z boku na náčrt vzduchotechnických žalúzií

Získaním výšok jednotlivých žalúzií vieme tieto hodnoty vložiť do predom pripravenej sketchy.

V prvotných návrhoch sa natočenie lopatiek a ich dĺžka odvíja od prvej, najspodnejšej lišty. Je to spôsobené tým, ako je možné vidieť v obrázku 3.1, prúd je nutné sklopiť o dosť rýchlejšie.

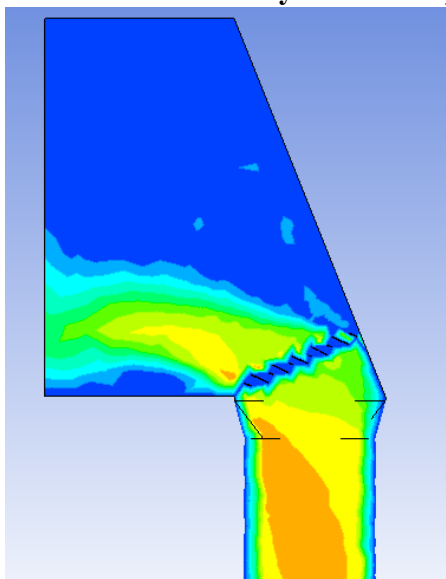
Geometricky sú lišty medzi sebou poprepájané tak, aby sa neprekryvali a zároveň aby sklopili len nominálny objem prúdu.



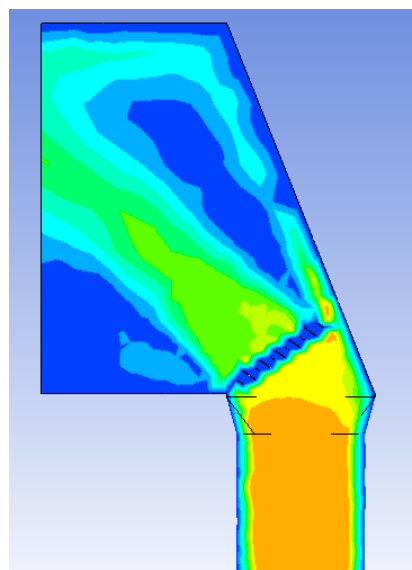
Obr. 3.9 Geometrická nadväznosť jednotlivých žalúzií

Rozdielne dĺžky žalúzií ako je možné vidieť na obrázku 3.9 sú spôsobené vstupným uhlom a dĺžkou prvej rolety.

### 3.4 Porovnanie nábehových uhlov lopatiek



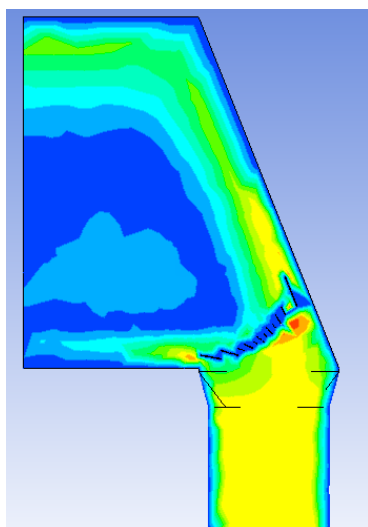
Obr. 3.10 Nábehový uhol 25 stupňov



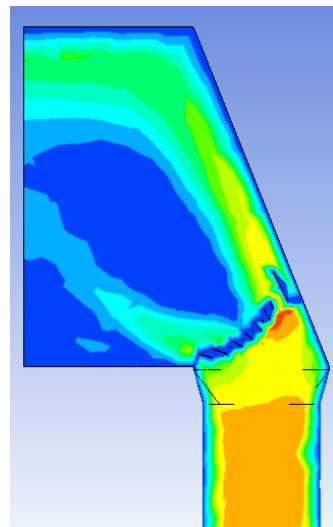
Obr. 3.11 Nábehový uhol 35 stupňov

Rovnaká dĺžka a nábehový uhol u všetkých lopatiek v kanály mal za následok to, že prúd bol síce usmernený no nie do všetkých častí. Vznikajú tak miesta kde sa prúd nedostane. Nerovnomerne rozdelený prúd v kanály má taktiež za následok tvorenie vírov a spätné prúdenie pri stenách kanálu.

Toto riešenie by bolo správne ak by boli zapojené ďalšie rady lopatiek s rozdielnym nábehovým uhlom. K tejto variante sa ale neprikláňame pretože je návrhovo zložitejšia a taktiež obťažnejšia na prevedenie. Pri uvažovaní varianty s dvoma radami lopatiek taktiež nebudú dosiahnuté minimálne náklady na prevedenie.



Obr. 3.12 Nábehový uhol 25 stupňov

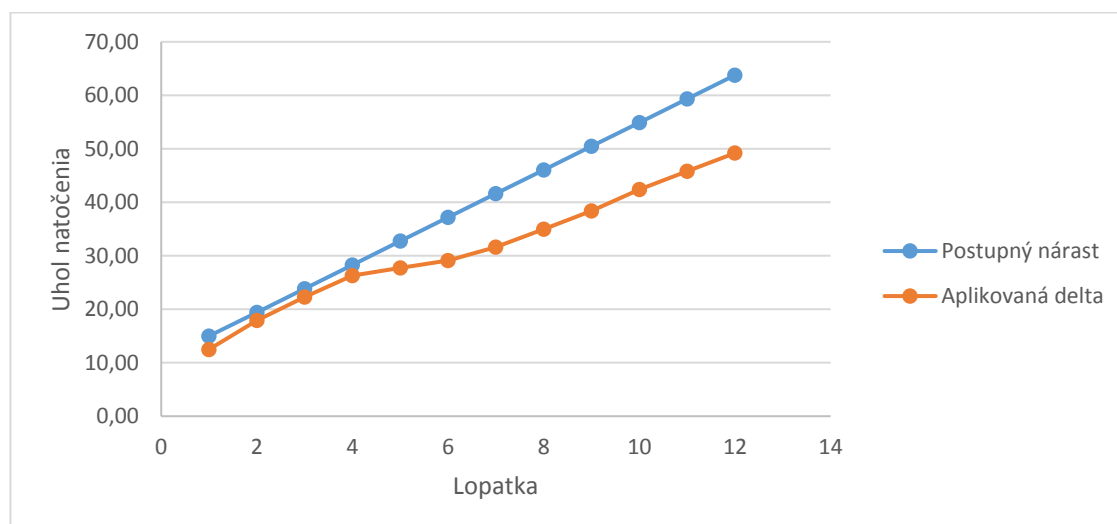


Obr. 3.13 Nábehový uhol 35 stupňov

Postupne zväčšenie nábehového uhla lopatiek prebehlo pomerovo a to tak že uhol poslednej lopatky bol rovnaký s šikmou stenou kanála resp. posledná lopatka bola uvažovaná ako stena kanála. Nábehový uhol 1. lopatky bol optimalizovaný tak, aby bol prúd sklopený na spodnú stenu kanála hneď od začiatku. Nábehové uhly postupne narastajú tak, aby vznikla lineárna postupnosť.

Od tejto zmeny je možné očakávať, že sa vstupujúci prúd dostane do väčšieho rozpätia. Z simulácií vyplynulo, že tento trend nastal ako je možné vidieť na obrázkoch. Potvrdilo sa aj to, že každá lopatka by mala mať vlastný uhol nábehu. Tento spôsob návrhu sa osvedčil hlavne pri kontrolovaní správnosti simulácií keď sa zmenili vstupne hodnoty tlaku, rýchlosti alebo teploty. Základná myšlienka naklopenia prúdu do celej vyrovnávacej časti C bola teda zachovaná bez nadväznosti na počiatočné podmienky.

Tento fakt môže v budúcnosti napomôcť samotnému zariadeniu meniť rôzne parametre stať sa tak viac flexibilným. Lineárnym nárastom nábehového uhlu lopatiek sa výsledkami potvrdilo správne smerovanie návrhu. Ako je ale z obrázkov jasné, lineárny nárast postačovať pre tento návrh nebude a je nutné pristúpiť ku kvadratickému návrhu.



*Obr. 3.14 Porovnanie lineárneho nárastu a kvadratického nárastu vstupných uhlov lopatiek*

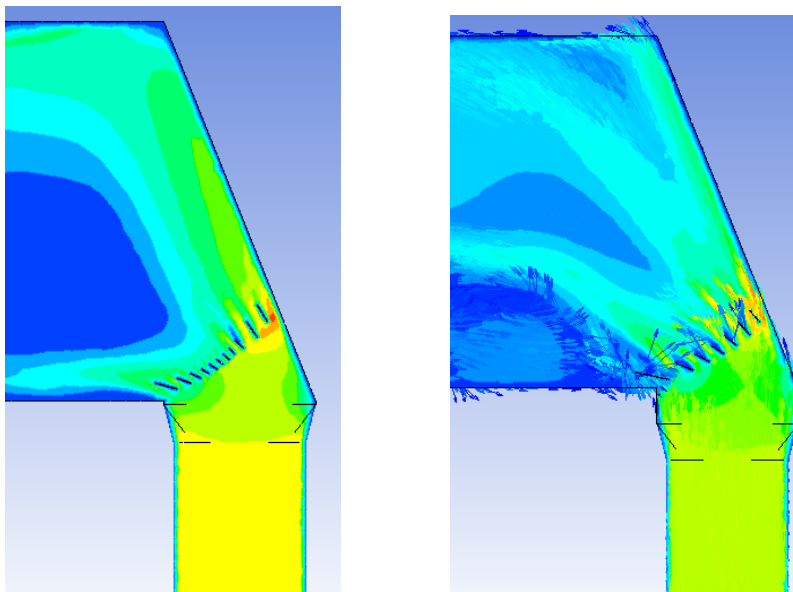
Vo verzii, kde je uvažovaný len lineárny nárast uhlov sme sa dopracovali k optimálnemu nábehovému uhlu prvej lopatky 15 stupňov. Tento uhol bol dostačujúci pre danú geometriu, aby naklonil prúd k spodnej časti C a zrovnal prúdenie pri stene.

Ako je vidno na obrázku 3.12 uhol 25 stupňov nebol dostačujúci, pretože po určitej vzdialenosti za lopatkou sa opäť odtrhával od spodnej časti C, kde dochádza k víreniu.

Nábehový uhol 10 stupňov bol z výsledkov simulácií príliš malý. Vyplynulo, že tento rýchly prechod spôsobí to, že prúd neskôr narazí na spodok vyrovnávacej časti C a začne tvoriť spätné prúdenie

Obrázok 3.14 slúži ako porovnanie nábehových uhlov lopatiek. Porovnáva nábehové uhly lineárneho a finálneho kvadratického nárastu. Vzniknutá kvadratická funkcia bola vytvorená aplikovaním delty na už existujúcu lineárnu funkciu. Funkcia bola vytvorená na základe experimentu, ktorý prebiehal v niekoľkých etapách. Počas jednotlivých etáp som sa sústredil najmä na neupchávanie prúdu v mieste lopatiek a ďalej na prúd, ktorý mal plniť čo najväčšieho objemu navrhnutého kanála.

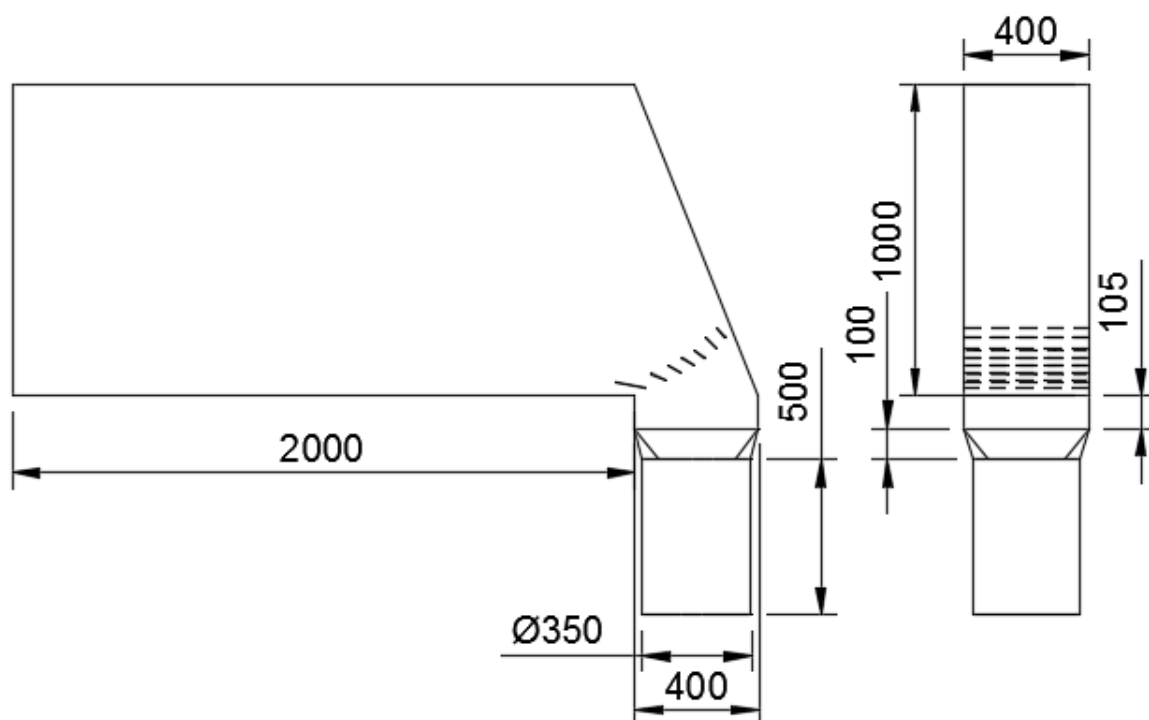
### 3.5 Finálny návrh varianty 1 a zhodnotenie



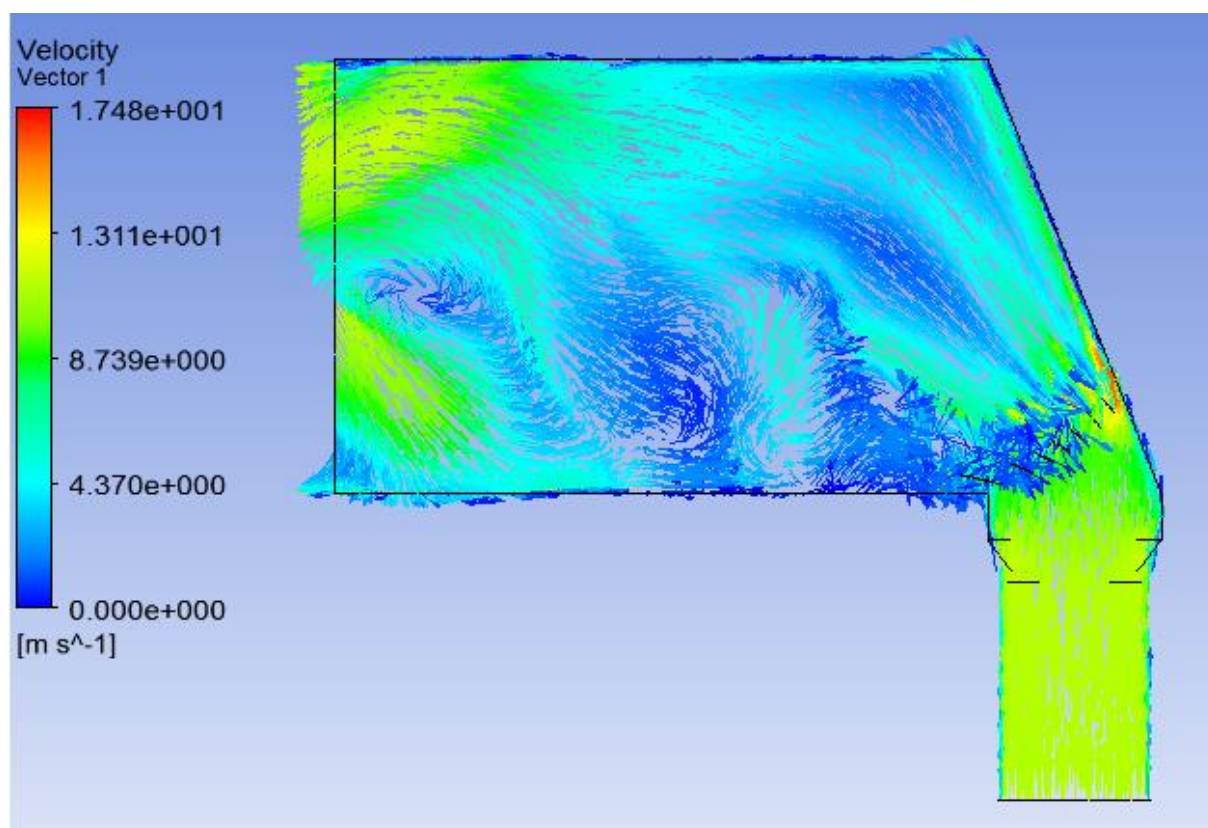
*Obr. 3.15 Lineárne narastajúci uhol Obr. 3.16 Kvadratický nárast s aplikovanou deltou*

Ako je vidno z obrázku 3.16, finálny počet lopatiek sa zmenšil z 12 na 8. Zmena nastala hlavne v strede lopatkového usporiadania. Menší počet lopatiek ale umožnil väčšie rozostupy a väčší objem vstupujúci medzi lopatky. V tejto verzii už nie je zachované rovnomerné rozdelenie prúdu do lopatkových dýz ale je daný dôraz na celkový výsledok. Pri menšom počte lopatiek zväčšíme ich dĺžku aby bola zabezpečená čo najväčšia efektivita naklopenia prúdu. Predĺženie umožňuje taktiež si viac naviesť prúd a dostať ho do lepšej pozície.





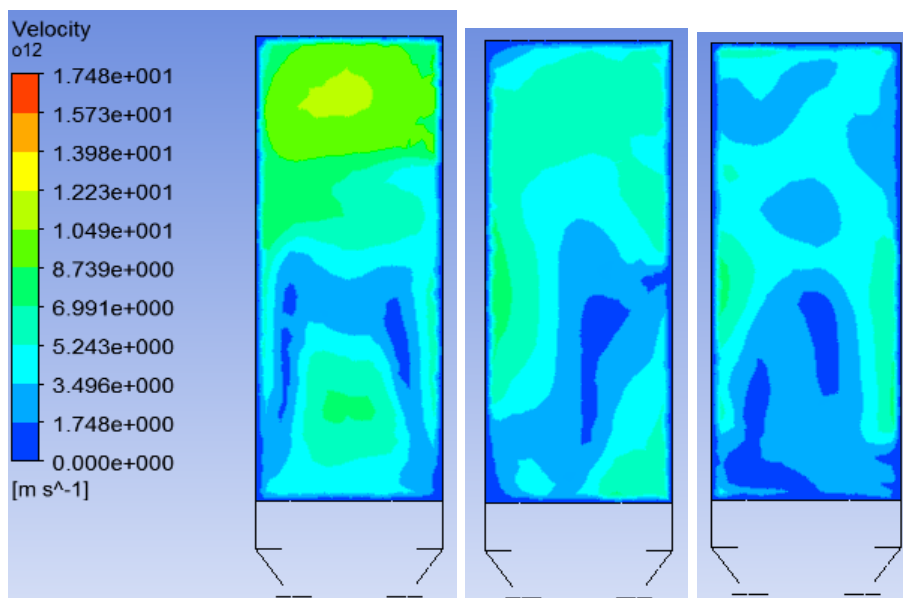
Obr. 3.17 Finálny návrh varianty 1 skúšobného zariadenia



Obr. 3.18 Prúdenie vo finálnom návrhu modelu 1

Zrovnomenenie prúdu v strednej časti kanála malo za následok to, že v spodnej časti vzniklo spätné prúdenie. Toto spätné prúdenie bolo spôsobené stále existujúcimi rýchlostnými rozdielmi a následným odtrhnutím prúdu vo vyrovnávacej časti, ktorý bol gravitáciou priťahovaný až ku spodnej časti kanála kde narazil na stenu a začal sa vracat' naspäť. Dá sa predpokladať, že časť týchto rozdielov bola spôsobená nedokonalou sieťou alebo nedopočítaním simulácie do konečného stavu s čo najmenšími odchýlkami a ustálením prúdenia.

Na obrázku 3.19 je možné vidieť neustálené rýchlostné pole v 3 rovinách ustaľovanej časti C modelu 1. Jedná sa o vzdialenosti 1.2 m, 0.8 m a 0.4 m od začiatku časti C v smere prúdenia. Z obrázku 3.17 sa dá odhadnúť, že neustálenie je spôsobené vírivým prúdením v časti C a teda aj keď sa môže zdať že rýchlosti na jednotlivých prierezoch nie sú vo veľkom rozpätí, smer prúdenia v pozorovaných rovinách nie je rovnaký.



Obr. 3.19 Porovnanie prúdenia v prierezoch časti C modelu 1

Do finálnej verzií s kvadratickým nárastom uhlov lopatiek ešte neboli vložené trubky ktoré by mohli potenciálne zabrániť spätnému prúdeniu pri ich vložení do časti s najrovnomernejším rýchlostným poľom. Tento odhad ale nebol ďalej podložený simuláciami a to z dôvodu, že počet a usporiadanie trubiek by sa malo meniť a teda by nieje správne určiť len vyhovujúce varianty. Dôvod je ten, že zariadenie by nemalo byť navrhnuté len na určitý počet variant, ale malo slúžiť pre akúkoľvek konfiguráciu usporiadania a rozmerov ofukovaných trubiek.

## 4 CFD návrh: variant 2 skúšobného zariadenia

Po výsledkoch z varianty 1 bola prehodnotená celková vízia a postup pri návrhu skúšobného zariadenia. Bolo rozhodnuté použiť poznatky a výsledky z predošlých simulácií a nepokračovať ďalej v optimalizácii varianty 1. Dôvody prečo bolo tak rozhodnuté sú: obťažný a zdĺhavý proces odstraňovania spätného prúdenia vznikajúceho v niektorých častiach modelu 1 spojený s navýšením výrobných nákladov a celkovo skomplikovaním prevedenia. Cieľ spraviť čo najjednoduchšie, najkompaktnejšie a najmenšie zariadenie by tak nebol splnený. Bolo rozhodnuté vytvoriť jednoduchšiu koncepciu už od prvého kroku a pokúsiť sa eliminovať komplikácie so spätným prúdením už v začiatku návrhu. Zmenám a celkovému návrhu 2 varianty sa venujem v nasledujúcej kapitole.

### 4.1 Návrh varianty 2

Model 2 vznikol ako alternatíva k Modelu 1. Vstupné podmienky a cieľ ostali zachované. Hlavnou zmenou je upustenie od konceptu kde vzduch do zariadenia vstupuje vertikálne a následne je preklopený do horizontálnej polohy. Model 2 pracuje čisto s horizontálnou koncepciou, kde vzduch ostáva celý čas v horizontálnej polohe. Časť B, hranaté prechodové koleno bolo takto z návrhu varianty 2 úplne vylúčené.

Hodnoty vstupnej a ustaľovanej časti boli použité z Modelu 1. Návrh sa následne skladal z 2 častí: návrh dýzy a návrh navádzacích lopatiek.

Os kruhového vstupu bola umiestnená tak, aby odpovedala stredovej osi vyrovnávacej časti v horizontálnom smere (obr. 4.8 a obr. 4.9). Možnosť posúvať os kruhového vstupu A sme zavrhlí z dôvodu zložitejšieho návrhu a nadväznosti na možné umiestnenie navádzacích lopatiek do priestoru dýzy. Samotné steny dýzy sú spravené z rovných častí a to z dôvodu následného prevedenia a vyrobiteľnosti.

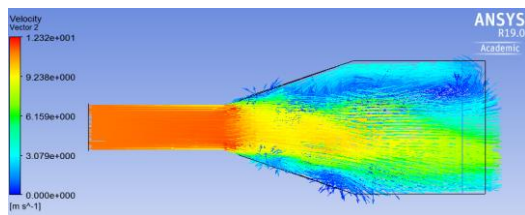
### 4.2 Návrh difúzoru

Vynechaním časti B v modeli 2 bolo potrebné zabezpečiť rovnomerné rozdelenie prúdu do celej časti C. Z tohto dôvodu bolo nutné navrhnuť od znova dýzu časti A tak aby bola priamym prepojením medzi kruhovým vstupom a hranatým potrubím vyrovnávacej časti. Vstup dýzy bol teda navrhnutý ako kruh s priemerom 350 mm a výstup ako obdĺžnik s rozmermi 400×1000 mm. Dĺžka dýzy bola experimentálne určená pre 2 hodnoty 500 a 1000 mm aby bolo možné v simulácií overiť správanie prúdenia po vstupe do dýzy. Po skúsenosti z návrhu varianty 1 bolo overené prúdenie aj pre rozdielne dĺžky ustaľovanej časti C a to pre 3 hodnoty 1000, 1500 a 2000 mm. Z kombinácií týchto 2 faktorov, dĺžka dýzy a dĺžka časti C vzniklo následne 6 možností prevedenia varianty 2. Tieto varianty sú samostatne pomenované a popísané v tabuľke 4.1

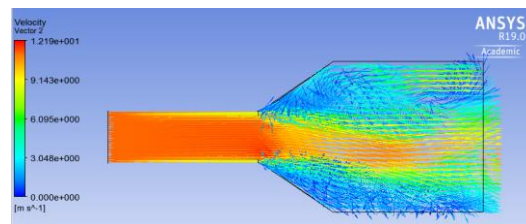
Tab.4.1 Dĺžkové prevedenia varianty 2

Názov	Dĺžka dýzy [mm]	Dĺžka ustaľovanej časti [mm]
Model 2.1	1000	1000
Model 2.2	1000	1500
Model 2.3	1000	2000
Model 2.4	500	1000
Model 2.5	500	1500
Model 2.6	500	2000

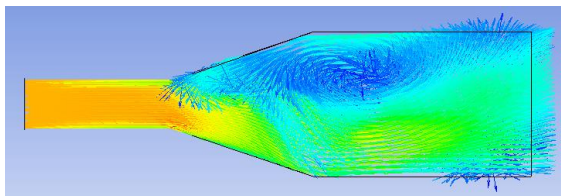
### 4.3 Porovnanie výsledkov difúzorov



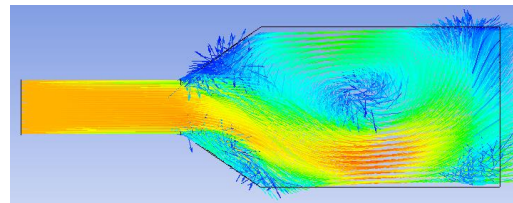
Obr. 4.1 Prúdenie Modelom 2.1



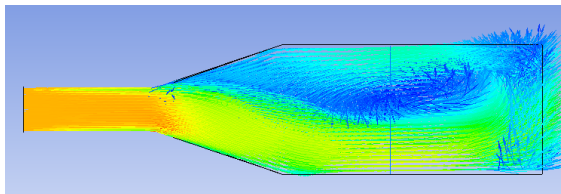
Obr. 4.2 Prúdenie Modelom 2.4



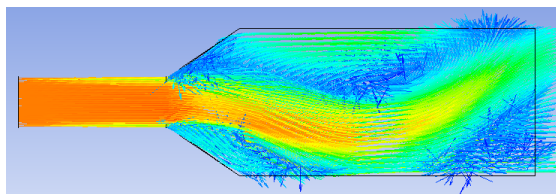
Obr. 4.3 Prúdenie Modelom 2.2



Obr. 4.4 Prúdenie Modelom 2.5



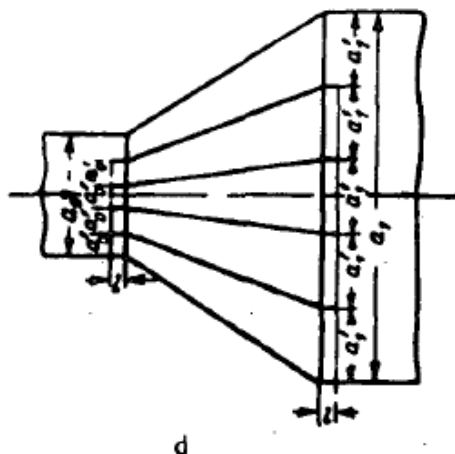
Obr. 4.5 Prúdenie Modelom 2.3



Obr. 4.6 Prúdenie Modelom 2.6

Výsledky simulácií potvrdili predpokladaný výsledok a to, že bude potreba využiť navádzacie lopatky. Taktiež sa potvrdilo to, že pre zadané vstupné parametre nebude rozšírenie dýzou stačiť natoľko aby sa prúd samostatne vyrovnal.

Možností ako dosiahnuť vyrovnanie a ustálenie prúdu nájdeme v literatúre niekoľko. Napríklad: viacstupňový difúzor, zahnutý difúzor, umiestnenie prekážok alebo navádzacích lopatiek. Po konzultácii sme sa rozhodli zvoliť najjednoduchšiu metódu z pohľadu prevedenia a konštrukcie: vložiť do difúzoru rozdeľovacie lopatky ktoré rovnomerne rozdelia prúd.



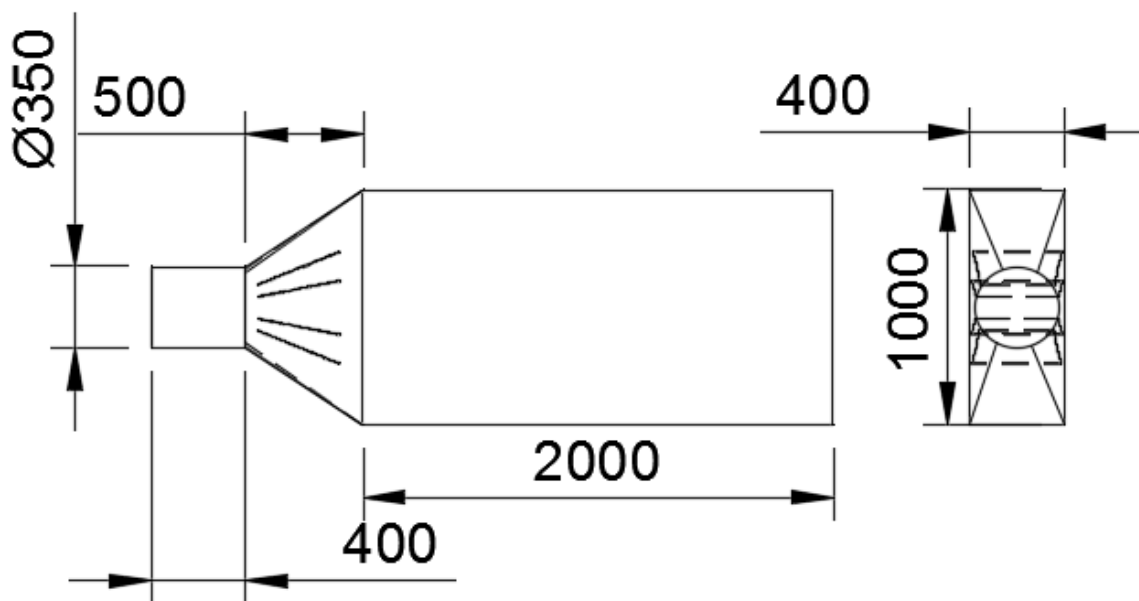
Obr. 4.7 Náčrt lopatiek v kanály difúzoru[15]

Pre aplikáciu lopatiek sme na základe výsledkov zvolili modely s dĺžkou ustáľovanej časti C 2000 mm. Volíme túto dĺžku z predpokladu, že rovina kedy už prúd bude ustálený sa nachádza v tejto dĺžke a preto nemá význam testovať lopatky aj pre kratšie prevedenie časti C.

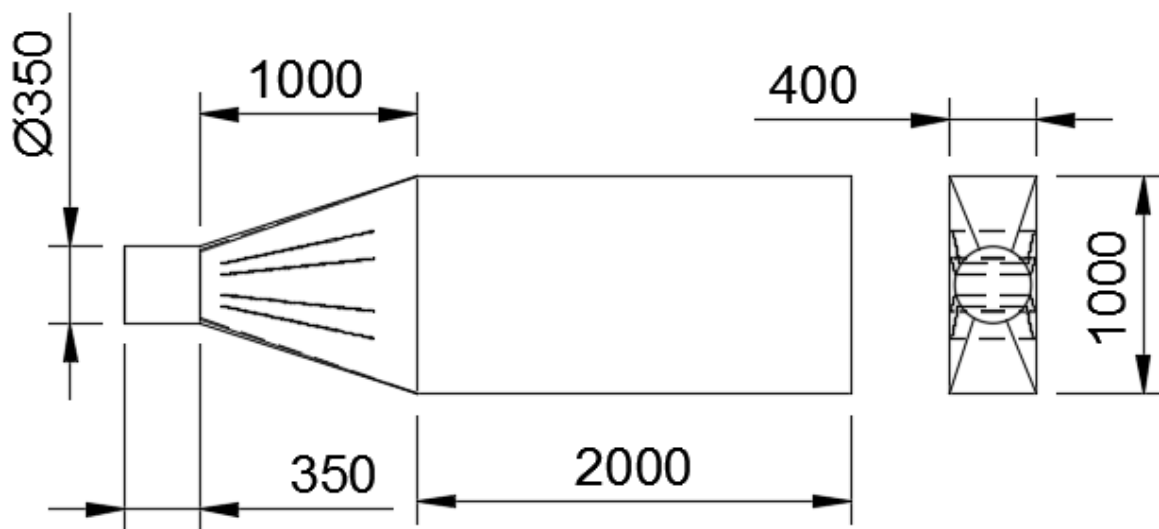
Lopatky sú navrhnuté ako rovné plechy ktoré pomáhajú rozdeliť prúd tak aby sa dostal rovnomerne do celého kanála čo bude mať za následok obmedzenie lokálnych vírov a zrovnomenenie rýchlostí v prierezoch vyrovnávacej časti za difúzorom. Pre zjednodušenie prevedenia sú zvolené záporné dĺžky l z obrázku 4.7. Dôvod je jednoduchšie vloženie a pripevnenie. Zároveň tak vieme ušetriť materiál a následnú prácu.

Lopatky sú umiestnené v kanály 50 mm od konca kruhového prierezu. V tomto umiestnení sa dá stále uvažovať prúd jednotný podľa Obr. 4.5 a Obr. 4.6. Druhou výhodou je tvorba simulácie kde nevznikne spätné prúdenie v kruhovom potrubí a zároveň sa prúd stihne rovnomerne rozdeliť.

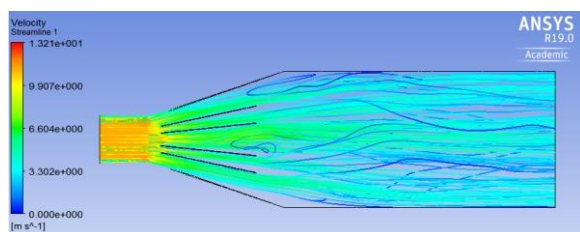
Pridaním lopatiek do dýzy sa jednoznačne ustálilo prúdenie a mohla tak vzniknúť rovina s najviac rovnomerným rýchlostným poľom. Z predošlých výsledkov prúdenia bolo taktiež skrátené vstupné potrubie čo nám dovolilo vytvoriť trochu presnejšiu sieť.



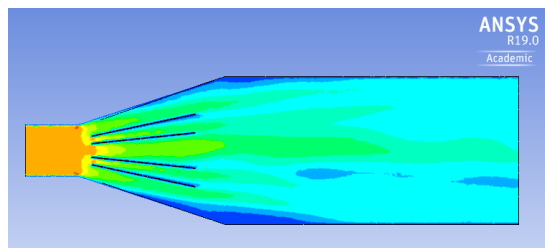
Obr. 4.8 Náčrt skúšobného zariadenia Modelu 2.6 a navádzacími lopatkami



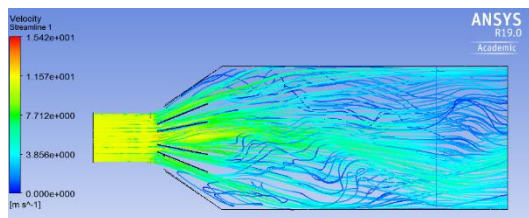
Obr. 4.9 Náčrt skúšobného zariadenia Modelu 2.3 a navádzacími lopatkami



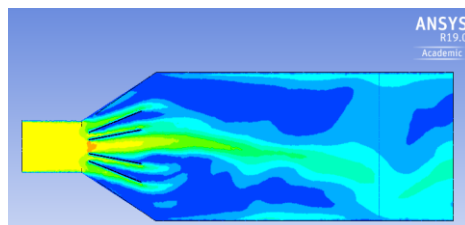
Obr. 4.10 Prúdnice Modelu 2.3



Obr. 4.11 Rýchlostné pole Modelu 2.3



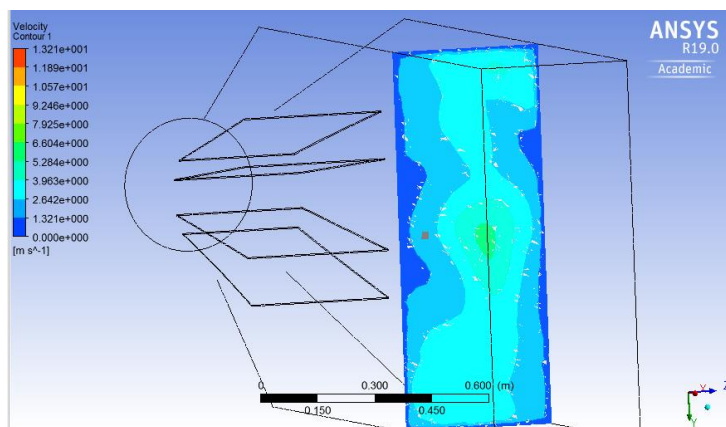
Obr. 4.12 Prúdnice Modelu 2.6



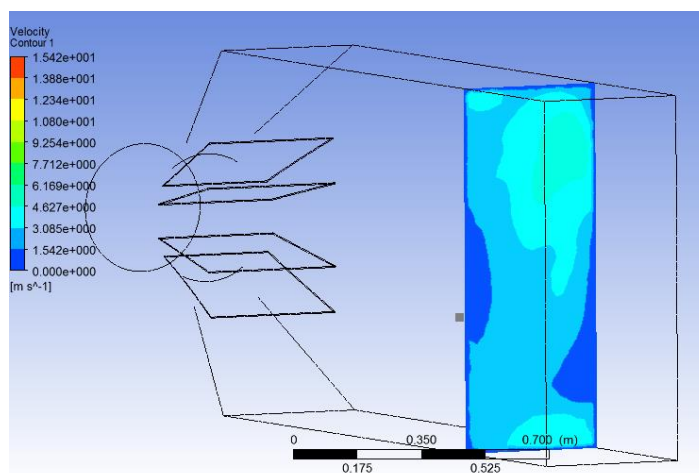
Obr. 4.13 Rýchlostné pole Modelu 2.6

Podobne výsledky je možné dostať aj pre model s dĺžkou dýzy 1000 mm. Po ustálení prúdenia v horizontálnej polohe, nieje už problém odhadnúť kde sa pravdepodobne nachádza rovina s najviac vyrovnanými rýchlosťami.





Obr. 4.14 Verzia 2.3, rovina sa nachádza 1000 mm od konca dýzy.

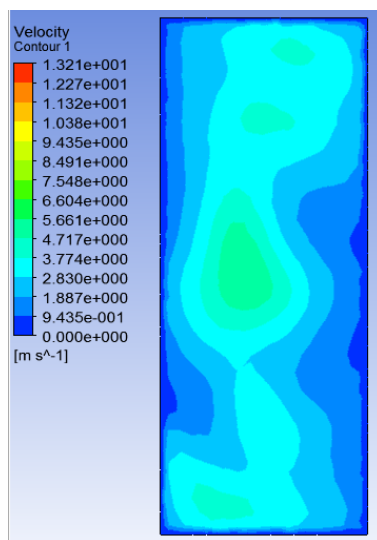


Obr. 4.15 Verzia 2.6, rovina sa nachádza 1700 mm od konca dýzy.

Rovina oboch verzií sa v relatívnom súradnicovom systéme nachádza zhruba na rovnakom mieste. Rozdiel je spôsobený pravdepodobne dĺžkou navádzacích lopatiek ktoré do značnej miery napomohli usmerneniu a vyrovnaniu rýchlosti. Ustálenie prúdu ale nastane v modeli 2.3 skôr ako vo verzií 2.6. Z tohto výsledku sú následne zobrazené len hodnoty pre model 2.3 ktorý bude predlohou pre finálne prevedenie skúšobného zariadenia. Z výsledkov simulácií je možné taktiež určiť požadovanú dĺžku časti C pred tým, než v nej budú umiestnené trubky ktoré majú byť ofukované.

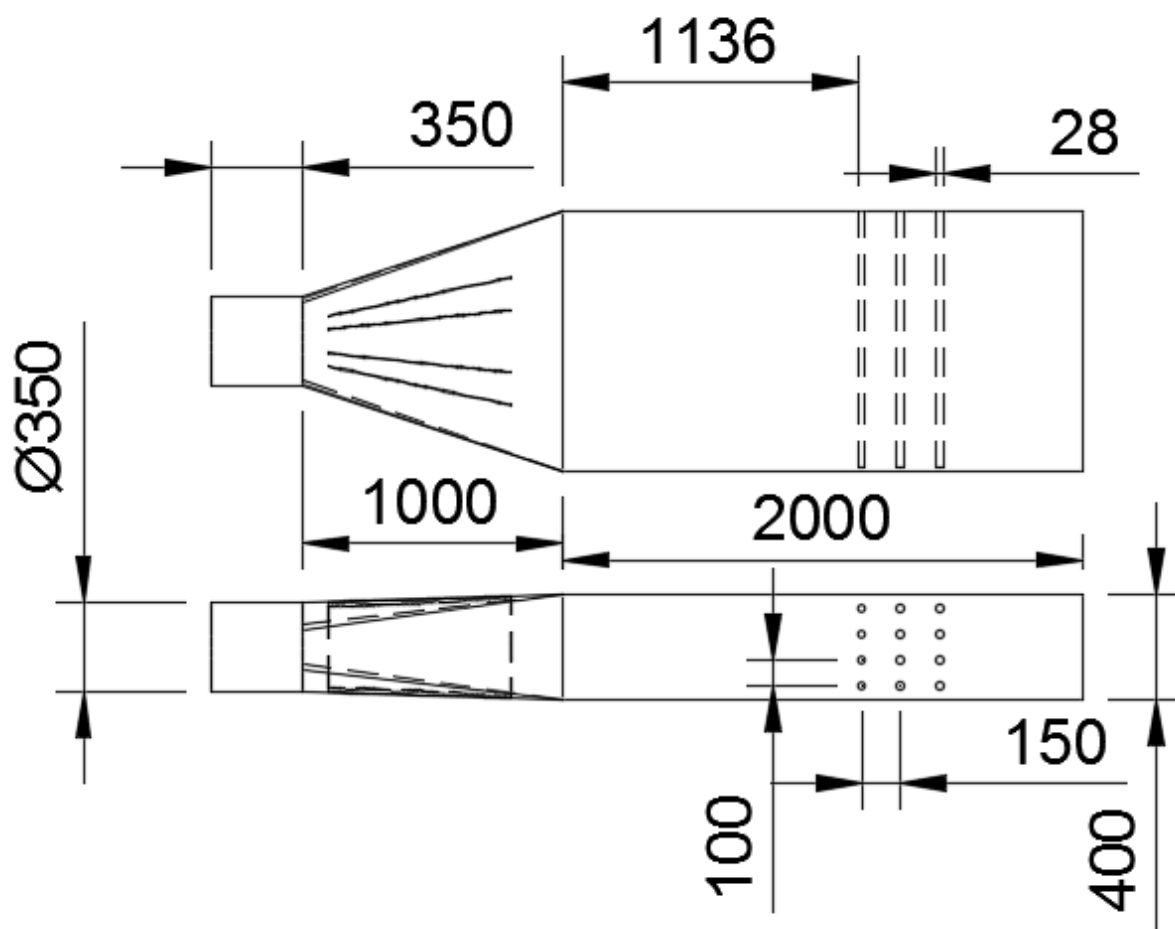
#### 4.4 Výsledky varianty 2

Po získaní výsledkov prúdenia v modeli 2.3 a nájdení roviny s ustáleným rýchlostným poľom je možné vyskúšať ofukovanie trubiek v usporiadanom a odstupňovanom usporiadaní. Rovina kde sa ustáli prúdenie je 2,35 m od začiatku skúšobného zariadenia. Ako je možné vidieť z obrázku 4.16 sú stále rýchlosti pri stenách blízke 0. V strede tejto roviny je najväčšia rýchlosť z dôvodu, že prúd neprechádza podľa návrhu takmer žiadnymi zmenami. Miesto s najväčšou rýchlosťou leží približne v podobnej polohe ako os kruhového vstupu časti A do zariadenia.



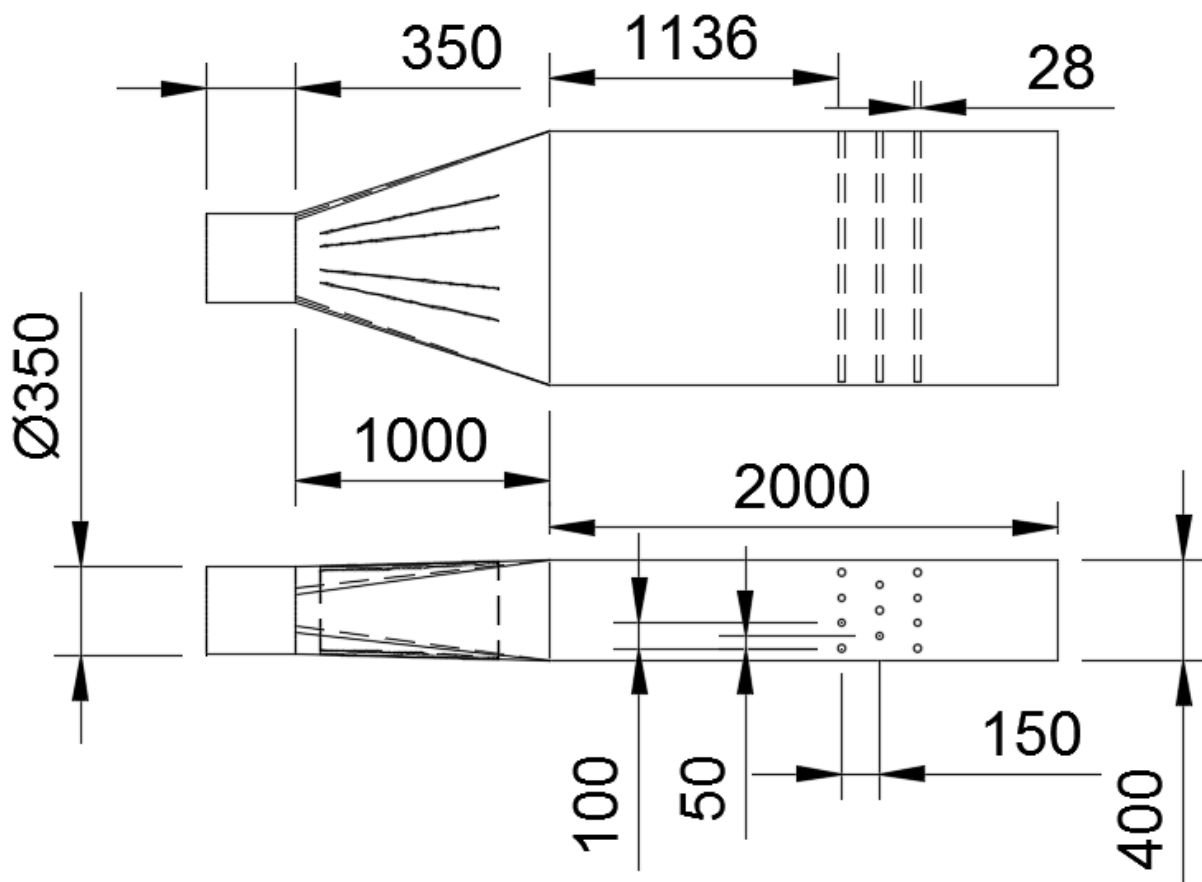
Obr. 4.16 Verzia 2.3, pohľad z predu na rýchlostné pole po vyrovnaní

Ofukovanie trubiek prebehlo pre dva prípady: usporiadanie trubiek za sebou (obrázok 4.17) a odstupňované usporiadanie trubiek (obrázok 4.18). Vstupné parametre pre simulácie ostali rovnaké.

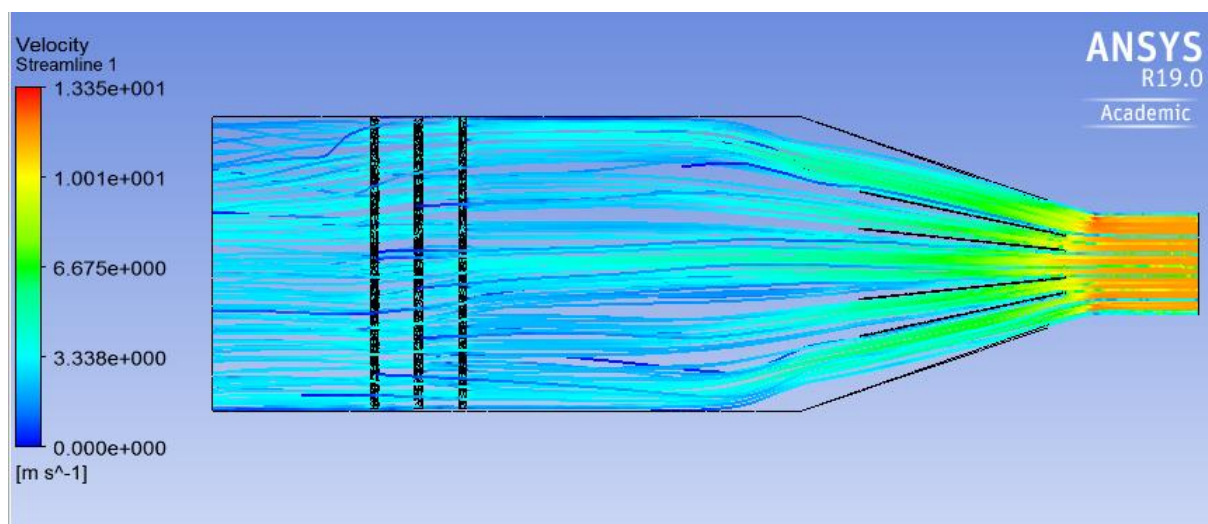




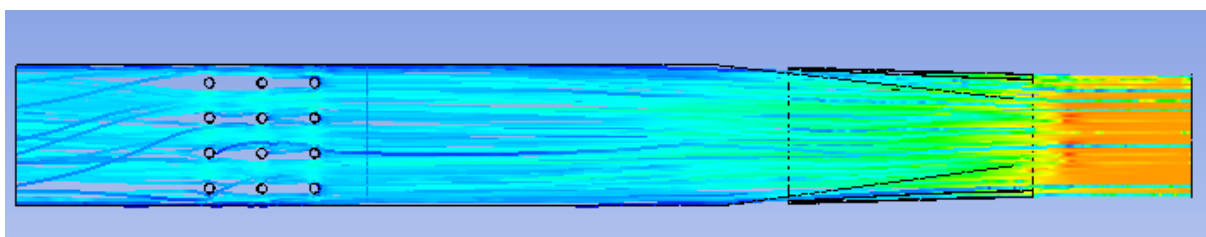
Obr. 4.17 Náčrt verzie 2.3 s ofukovanými trúbkami v usporiadanými za sebou



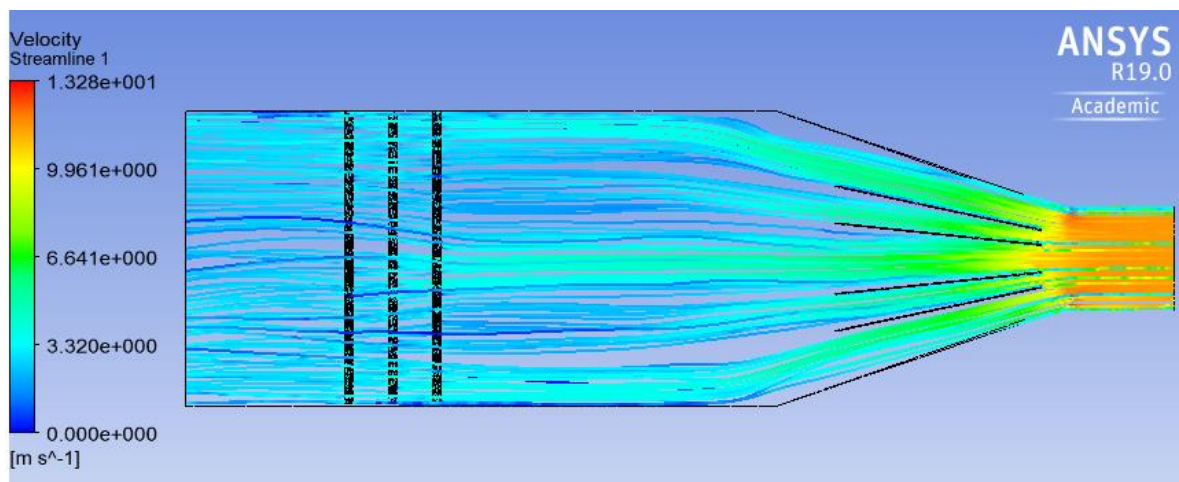
Obr. 4.18 Náčrt verzie 2.3 s ofukovanými odstupňovaným usporiadaním trúbiek



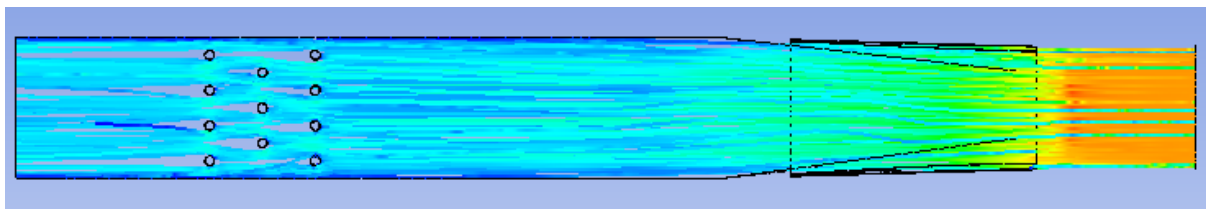
Obr. 4.19 Verzia 2.3, pohľad z predu na ofukovanie trúbiek za sebou



Obr. 4.20 Verzia 2.3, pohľad z hora na ofukovanie trubiek za sebou



Obr. 4.21 Verzia 2.3, pohľad z predu na ofukovanie odstupňovaného usporiadania trubiek



Obr. 4.22 Verzia 2.3, pohľad z hora na ofukovanie odstupňovaného usporiadania trubiek

## ZÁVĚR

Počas návrhu skúšobného zariadenia bolo vyskúšaných a overených niekoľko desiatok návrhov, zmien a úprav. Všetky medzi kroky spomenuté v predošlých kapitolách napomohli k vytvoreniu finálneho zariadenia ktoré bude schopne operovať v širokom spektre vstupných a výstupných hodnôt.

Návrh skúšobného zariadenia prešiel niekoľkými štádiami. Najprv analýzou poznaných hodnôt rozmerov, jednotlivých častí, použitého ventilátora a samotných vstupov a výstupov zo zariadenia. Analytický návrh pomohol predbežne určiť ako sa zariadenie bude správať a na čo sa bude treba zamerať pri konštrukčnom návrhu. Prínosné bolo taktiež, že navažujúce konštrukčné kroky neboli priamo naviazané na známe hodnoty ale vychádzali zo všeobecného zadania. V praxi to znamená to, že ak sa niektoré parametre vstupného prúdu budú meniť zariadenie bude schopne bez problémov fungovať aj pri iných parametroch a nielen pre jeden návrhový bod.

Následný konštrukčný návrh oboch variant bol sprevádzaný CFD analýzou pre každú zmenu ktorá nastala. Od rozmerových uprav, cez návrh jednotlivých častí a navádzacích lopatiek až do momentu kedy boli výsledky dostačujúce na to, otestovať prúdenie medzi usporiadaným poľom trubiek umiestnených v zariadení. Z výsledkov popísaných v kapitole 4.6 je možné povedať, že zariadenie bude spĺňať všetky požiadavky vytýčené na začiatku práce. Konkrétne sa jedná o výsledky z obrázku 4.20 a obrázku 4.22 kde je vidno ustálenie vstupného prúdu v zariadení a prúdenie medzi trúbkami.

Skúšobné zariadenie je aktuálne vo finálnom štádiu návrhu. Okrem rozdielných usporiadaní trubkového poľa je tak isto ešte priestor overiť prúdenie keď bude zariadenie natočené do rozličných polôh, maximálne o  $90^\circ$ . Ostatné natočenia tak budú len variáciou už otestovaných natočení zariadenia

## ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] HUNDY, G.F., A.R. TROTT a T.C. WELCH. Condensers and Cooling Towers. Refrigeration, Air Conditioning and Heat Pumps. Elsevier, 2016, 2016, , 99-120. DOI: 10.1016/B978-0-08-100647-4.00006-1. ISBN 9780081006474. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780081006474000061>
- [2] Rýchlosti vzduchu v kondenzátore [online]. Kharagpur, India, 2008 [cit. 2019-05-01] Dostupné z: [www.techbooksyard.com/40-lessons-on-refrigeration-and-air-conditioning/402/](http://www.techbooksyard.com/40-lessons-on-refrigeration-and-air-conditioning/402/). Indian Institute of Technology Kharagpur
- [3] Steam/ its generation and use. 41. Babcox & Wilcox Company, 2005. ISBN 0-9634570-1-2
- [4] Air-cooled condensers eliminate plant water use. Power Mag [online]. 2008, , 3 [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <https://www.powermag.com/air-cooled-condensers-eliminate-plant-water-use/?pagenum=1>
- [5] LONG, Marshall. Noise in Mechanical Systems. Architectural Acoustics. Elsevier, 2014, 2014, , 495-528. DOI: 10.1016/B978-0-12-398258-2.00013-1. ISBN 9780123982582. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780123982582000131>
- [6] KRÖGER, Detlev G. Air-Cooled Heat Exchangers and Cooling Towers: thermalflow performance evaluation and design. Matieland, South Africa: University of Stellenbosch,
- [7] Rodriguez P. (1997). Selection of Materials for Heat Exchangers. 3rd International Conference on Heat Exchangers, Boilers and Pressure Vessels (HEB 97), Alexandria, Egypt, pp. 59-72.
- [8] THULUKKANAM, Kuppan. Heat Exchanger Design Handbook. 2. New York: CRC Press, 2013. ISBN 978-1-4398-4213-3.
- [9] A-to-Z Guide to Thermodynamics, Heat and Mass Transfer, and Fluids Engineering. 2006. DOI: 10.1615/AtoZ.t.tube\_banks\_crossflow\_over.
- [10] Pokroky matematiky, fyziky a astronomie [online]. 2001, 2(46) [cit. 2019-05-03]. ISSN 0032-2423. Dostupné z: <https://dml.cz/handle/10338.dmlcz/141072>
- [11] Oběžné kolo s dozadu zahnutými lopatkami – pohon motoru napřímo: Technické parametry ventilátorov, Elektrodesign ventilátory spol. s r.o. STARÁ BOLESLAV.
- [12] Direct Driven Centrifugal Fan FR 351 N: Technický list, Elektrodesign ventilátory spol. s r.o. 250 01 STARÁ BOLESLAV, 2018.
- [13] Viscosity of air dynamic and kinematic [online]. 2019 [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: [https://www.engineersedge.com/physics/viscosity\\_of\\_air\\_dynamic\\_and\\_kinematic\\_14483.htm](https://www.engineersedge.com/physics/viscosity_of_air_dynamic_and_kinematic_14483.htm)
- [14] BEITZ, W. a K.-H. KUTTNER. DUBBEL Handbook of MECHANICAL ENGINEERING. 1. Londýn: Springer-Verlag London, 1994. ISBN 9781447135685.
- [15] Metody vylepšenia krátkých difúzorov. IDEL'CHIK, I.E. Handbook of hydraulic resistance. 1. Moskva: Gosudarstvennoe Energeticheskoe Izdatel'stvo, 1960, s. 157. ISBN 8179921182.
- [16] Standard\_k-epsilon\_model. <https://www.cfd-online.com> [online]. [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: [https://www.cfd-online.com/Wiki/Standard\\_k-epsilon\\_model](https://www.cfd-online.com/Wiki/Standard_k-epsilon_model)

- [17] Wilcox's\_k-omega\_model. <https://www.cfd-online.com/> [online]. [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: [https://www.cfd-online.com/Wiki/Wilcox%27s\\_k-omega\\_model](https://www.cfd-online.com/Wiki/Wilcox%27s_k-omega_model)
- [18] SST\_k-omega\_model. <https://www.cfd-online.com/> [online]. [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: [https://www.cfd-online.com/Wiki/SST\\_k-omega\\_model](https://www.cfd-online.com/Wiki/SST_k-omega_model)
- [19] Výpočet kruhového segmentu. <https://math.stackexchange.com> [online]. [cit. 2019-04-30]. Dostupné z: <https://math.stackexchange.com/questions/880362/calculate-circle-segment-area-determine-distance>

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
a	Šírka časti A	mm
b	Výška časti A	mm
l	Dĺžka časti	mm
d	Priemer vstupného potrubia	mm
h	Výška žalúzie	mm
R	Polomer vstupného potrubia	mm
S	Plocha vstupného potrubia	m <sup>2</sup>
St	Rozteč medzi trúbkami	mm
c	Rýchlosť prúdenia	m/s
$c_{max}$	Maximálna rýchlosť prúdenia medzi trúbkami	m/s
$\dot{V}$	Objemový prietok za sekundu	m <sup>3</sup> /s
$\dot{V}_{max}$	Maximálny objemový prietok za sekundu	m <sup>3</sup> /s
$\dot{V}_{nom}$	Nominálny objemový prietok za sekundu	m <sup>3</sup> /s
Sh	Strouhalove číslo	-
P	Výkon	kW
n	otáčky	RPM
p	Absolútny tlak	Pa
$\Delta P$	Straty v potrubí	$Kg \cdot \frac{s}{m}$
$\rho$	Hustota	$Kg/m^3$
Deq	Hydraulický parameter	-
Re	Reynoldsovo číslo	-
$\mu_k$	Kinematická viskozita	m <sup>2</sup> /s
$\lambda$	Dĺžková strata potrubia	-
$\xi$	Lokálna strata potrubia	-
$\alpha$	Uhol	°

## ZOZNAM OBRÁZKOV

- Obr. 1.1 Kondenzátor A-typ[4]  
Obr. 1.2 A) Kondenzátor prefukovaný radiálním ventilátorem B) Kondenzátor prefukovaný axiálním ventilátorem[5]  
Obr. 1.3 C) Podtlakový kondenzátor s indukovaným ťahom D) Pretlakový kondenzátor s vynúteným ťahom[5]  
Obr. 1.4 Základné možnosti usporiadania trubiek vo vzduchovom kondenzátore [8]  
Obr. 1.5 Porovnanie vlastných amplitúd odstupňovaného a za sebou usporiadania[8]  
Obr. 1.6 Okótované usporiadanie trubiek a naznačené maximálne rýchlosti[8]  
Obr. 1.7 Ďalšie príklady rozmiestnenia trubiek[8]  
Obr. 1.8 Odtrhávajúce vírov za trúbkou  
Obr. 1.9 Porovnanie aproximácií Strouhalového čísla Massleym a Jarierom[10]  
Obr. 2.1 Schéma skúšobného zariadenia  
Obr. 2.2 Návrhové krivky ventilátoru FR 351 N[12]  
Obr. 2.3 Náčrt všeobecného difúzoru  
Obr. 2.4 Straty v difúzore pre prechod z kruhového prierezu na hranatý[15]  
Obr. 3.1 Prúdenie časťou A\_1  
Obr. 3.2 Prúdenie časťou A\_2  
Obr. 3.3 Prúdenie časťou A\_3  
Obr. 3.4 Prúdenie časťou A\_4  
Obr. 3.5 Výkres skúšobného zariadenia s označenými časťami  
Obr. 3.6 Prúdenie v tuneli  
Obr. 3.7 Náhľad na kruhový výsek [19]  
Obr. 3.8 Pohľad z boku na náčrt vzduchotechnických žalúzií  
Obr. 3.9 Geometrická nadväznosť jednotlivých žalúzií  
Obr. 3.10 Nábehový uhol 25 stupňov  
Obr. 3.11 Nábehový uhol 35 stupňov  
Obr. 3.12 Nábehový uhol 25 stupňov  
Obr. 3.13 Nábehový uhol 35 stupňov  
Obr. 3.14 Porovnanie lineárneho nárastu a kvadratického nárastu vstupných uhlov lopatiek  
Obr. 3.15 Lineárne narastajúci uhol  
Obr. 3.16 Kvadratický nárast s aplikovanou deltou  
Obr. 3.17 Finálny návrh varianty A skúšobného zariadenia

- Obr. 3.18 Prúdenie vo finálnom návrhu modelu 1
- Obr. 3.19 Porovnanie prúdenia v prierezoch časti C modelu 1
- Obr. 4.1 Prúdenie Modelom 2.1
- Obr. 4.2 Prúdenie Modelom 2.4
- Obr. 4.3 Prúdenie Modelom 2.2
- Obr. 4.4 Prúdenie Modelom 2.5
- Obr. 4.5 Prúdenie Modelom 2.3
- Obr. 4.6 Prúdenie Modelom 2.6
- Obr. 4.7 Náčrt lopatiek v kanály difúzoru[15]
- Obr. 4.8 Náčrt skúšobného zariadenia Modelu 2.6 a navádzacími lopatkami
- Obr. 4.9 Náčrt skúšobného zariadenia Modelu 2.3 a navádzacími lopatkami
- Obr. 4.10 Prúdnice Modelu 2.3
- Obr. 4.11 Rýchlostné pole Modelu 2.3
- Obr. 4.12 Prúdnice Modelu 2.6
- Obr. 4.13 Rýchlostné pole Modelu 2.6
- Obr. 4.14 Verzia 2.3, rovina sa nachádza 1000 mm od konca dýzy
- Obr. 4.15 Verzia 2.6, rovina sa nachádza 1700 mm od konca dýzy
- Obr. 4.16 Verzia 2.3, pohľad z predu na rýchlostné pole po vyrovnaní
- Obr. 4.17 Náčrt verzie 2.3 s ofukovanými trúbkami v usporiadanými za sebou
- Obr. 4.18 Náčrt verzie 2.3 s ofukovanými odstupňovaným usporiadaním trúbek
- Obr. 4.19 Verzia 2.3, pohľad z predu na ofukovanie trúbek za sebou
- Obr. 4.20 Verzia 2.3, pohľad z hora na ofukovanie trúbek za sebou
- Obr. 4.21 Verzia 2.3, pohľad z predu na ofukovanie odstupňovaného usporiadania trúbek
- Obr. 4.22 Verzia 2.3, pohľad z hora na ofukovanie odstupňovaného usporiadania trúbek



## **ZOZNAM TABULIEK**

Tab.4.1 Dĺžkové prevedenia varianty 2

